

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR
DE BIOMASA RESIDUAL EN GRANJAS DE CERDO DE UNA INDUSTRIA PORCÍCOLA**

CARLOS HERNANDO GONZALEZ RUBIO

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

CALI

OCTUBRE 2016

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR
DE BIOMASA RESIDUAL EN GRANJAS DE CERDO DE UNA INDUSTRIA PORCÍCOLA**

CARLOS HERNANDO GONZALEZ RUBIO

Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería Industrial

Director proyecto

KATHERINE ORTEGON MOSQUERA, Ph.D

UNIVERSIDAD ICESI

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

CALI

OCTUBRE 2016

Contenido	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	12
1.1. Contexto Del Problema	13
1.2. Análisis Y Justificación	14
1.3. Formulación Del Problema.....	15
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo General.....	15
2.2. Objetivo del Proyecto	16
2.3. Objetivos Específicos	16
3. MARCO DE REFERENCIA	16
3.1. Antecedentes o Estudios Previos	16
3.2. Marco Teórico.....	18
3.2.1. Industria Porcina.	18
3.2.1.1. Ciclo de Producción Porcina.....	19
3.2.1.2. Purines	21
3.2.2. Aspectos Generales de la Producción De Biogás.	23
3.2.2.1. Producción de Biogás.....	25
3.2.3. Conversión de Biogás a electricidad.....	29
3.2.4. Marco Legal Colombiano.....	31
3.3. Aporte Critico	32
4. METODOLOGÍA	33
4.1. Metodología De Análisis.	33
4.1.1. Evaluar y Comparar modelos para producción de energía a través de la transformación de la Biomasa en las granjas.....	34
4.1.2. Determinar el potencial de generación de energía para cada una de las granjas. 35	

4.1.3. Determinar los mecanismos técnicos y legales de la entrega de energía al gestor de la red eléctrica y evaluar la viabilidad financiera de la producción de energía de la biomasa.	36
5. RESULTADOS.....	37
5.1. Evaluación y Comparación de Modelos Para Producción de Energía a Través de la Transformación de la Biomasa en las Granjas.	38
5.1.1. Caracterización de la producción de biogás en las granjas de una empresa del sector porcícola.	43
5.2. Determinar el potencial de generación de energía para cada una de las granjas.	48
5.2.1.1. Ubicación planta centralizada para la producción de energía eléctrica.....	51
5.3. Determinar los mecanismos técnicos y legales de la entrega de energía al gestor de la red eléctrica y evaluar la viabilidad financiera de la producción de energía de la biomasa.	52
5.3.1. Marco Legal del proyecto.....	52
5.3.2. Entrega de energía eléctrica al gestor de la red.....	55
5.3.2.1. Conexión al SDL para proyectos de Autogeneración CLASE I.	56
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	68

Lista de Figuras

Figura 1 . Sistema productivo de ciclo cerrado.....	20
Figura 2 Componentes de un sistema de producción intensiva.....	21
Figura 3 Ciclo de producción de Biogás por Digestión Anaerobia	24
Figura 4 Digestor Tipo Taiwan.....	26
Figura 5 Laguna de Oxidación Anaeróbica	27
Figura 6 Posibles usos del Biogás.....	29
Figura 7 Esquema Básico para uso del biogas.....	30
Figura 8 Datos y análisis del proyecto.....	33
Figura 9 Esquema de producción Planta de pequeña escala.....	39
Figura 10 Esquema de producción centralizada de Mediana tamaño	40
Figura 11 Esquema de producción centralizada de Gran tamaño.....	41
Figura 12 Mapa ubicación de las Granjas Visitadas	44
Figura 13 Proceso actual de las granjas.....	45
Figura 14 Ubicación Geográfica de la planta centralizada en el modelo CDG.....	52
Figura 15 Proceso de interconexión para el SIN	55
Figura 16 Diseño de interconexión.....	57
Figura 15. Ficha técnica Generador AQUALIMPIA para granja de pequeña escala	82
Figura 16. Ficha técnica Generador AQUALIMPIA para Planta de mediana escala	83
Figura 17. Costo transporté de materia prima por Km y Tonelada	86
Figura 18. Informe de respuesta del modelo binario	93

Lista de Tablas

Tabla 1. Inventario Poblacional Ganado porcino 2009 -2015 datos ICA.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Caracterización purín de cerdo (Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, 2005)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Producción estimada Diaria de Excretas según el tipo de Cerdo (DOURMAND, 1991)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Caracterización del Biogás.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. Rendimiento del Biogás dependiendo del tipo de purí(E.V., 2010).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6. Métodos de desulfuración(E.V., 2010)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Matriz Legal	31
Tabla 8. Factores Claves de los tres modelos de plantas de biogas¡	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9. Ventajas y Desventajas de los tres modelos(Frandsen et al., 2011).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10. Datos Generales recolectados en las Granjas. ¡	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11. Resumen cálculos de producción de materia prima y biogas en las granjas	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12. Estimación de la producción de energía eléctrica en las Granjas con la producción actual de Biogas.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13. Estimación de la producción de energía en las Granjas con producción teórica del Biogas (UPME).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 14. Estimación de la producción de energía en una planta centralizada de mediana escala.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 15. Resumen del marco legal	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16. Resumen del marco legal.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 17. Costos de Inversión y Operativos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 18. Porcentaje de Inversión Requerida por cada Granja según la rubrica para inversión usada.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 19. Incremento de la inversión por aporte de la granja¡	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 20. Distancia y Costo de transporte de la materia prima de las diferentes granjas a la planta de mediana escala ubicada en Piedras Gordas.¡	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 21. Criterios Financieros por Granja	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 22 Criterios Financieros por Aporte de Granja	¡Error! Marcador no definido.

Tabla 23. Distribucion de la produccion nacional de cerdos (ICA, 2016)	72
Tabla 24. Resumen Datos plantas de gran tamaño (Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 2000)	73
Tabla 25. Resumen datos plantas de mediana escala(Frandsen et al., 2011).....	74
Tabla 26. Resumen datos Plantas de autogeneración	76
Tabla 27. Inventario de cerdos.....	77
Tabla 28. Parametros de las granjas según el estadio del animal	78
Tabla 29. Tipo de digestores ubicados en las granjas	78
Tabla 30. Datos Produccion excretas según el tip de cerdo (Chile, 2005)	79
Tabla 31. Parametros según el tipo de sustrato (Unidad de Planeacion Minero Energetico (UPME), 2015).....	80
Tabla 32. Resumen datos para centro de Gravedad.....	84
Tabla 33. Parámetros financieros (Ministerio de Industria y Comercio Gobierno de España, 2005)	85
Tabla 34. Inflación anual en España del 2005 al 2016.....	85
Tabla 35. Rubrica (Fondo Europeo de Desarrollo Regional; Programa de Cooperacion Transfronteriza España - Portugal; Altercexa, 2010).....	86
Tabla 36. Parámetros de distancia y aporte en toneladas de las granjas a la planta de Piedras Gordas.....	87
Tabla 37. Precio de la energía para el mercado regulado en Colombia 2010 -2015 (Velez Alvarez, 2015).....	87
Tabla 38. VPN anual para los proyectos	87
Tabla 39. Asociacion del ubindice “j” a las granjas para el modelo binario.....	91
Tabla 40. Parametros de variacion según “j” usados para el modelo binario.....	91
Tabla 41. Parametros economicos usados para el modelo binario.....	92
Tabla 42. Parametros Numericos usados para el modelo binario.....	92
Tabla 43. Parametros porcentuales de incremento usados para el modelo binario.....	93

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Calculo producción de estiércol solido	35
Ecuación 2. Calculo producción de orín.....	35
Ecuación 3. Calculo cantidad Materia prima de carga.....	35
Ecuación 4. Calculo producción estimada de Biogás	35
Ecuación 5. Calculo producción estimada de Energía Eléctrica	35
Ecuación 6. Coordenadas en “x”	36
Ecuación 7. Coordenadas en “y”	36
Ecuación 8. Calculo de Flujo total de excretas (Chile, 2005)	79
Ecuación 9. Calculo producción de estiércol solido	80
Ecuación 10. Calculo producción de orín	81
Ecuación 11. Calculo cantidad Materia prima de carga.....	81
Ecuación 12. Calculo % Solidos Totales.....	81
Ecuación 13. Calculo del Tiempo de Retención Hidráulica	81
Ecuación 14. Calculo Volumen biodigestor	81
Ecuación 15. Calculo producción estimada de Biogás.....	81
Ecuación 16. Coordenadas en x.....	84
Ecuación 17. Coordenadas en y.....	84
Ecuación 18. Costo total de transporte	89
Ecuación 19. Aporte total de energía.....	89
Ecuación 20. Costo total de operación	90
Ecuación 21. Ingresos de la planta.....	90
Ecuación 22. Inversión total de la planta	90
Ecuación 23. Función objetivo VPN.....	91

Lista de Gráficos

Grafico 1 Proyección Beneficio Porcino Anual (cabezas)	15
Grafico 2 . Porcentaje Cabezas de Porcino por Región.....	19
Grafico 3 Inventario de cerdos en las granjas seleccionadas para el estudio	44
Grafico 4 Comparación de consumo de energía y producción de energía teórica por granja.....	50
Grafico 5 Comparación de consumo de energía por día de todas las granjas y producción de energía teórica de la granja centralizada.	51
Grafico 6 Precio de Bolsa y Contratos por tipo de Mercado pesos Constantes de Agosto 2016.....	61
Grafico 7 Precio promedio anual del kwh en centavos de euros.	62
Grafico 8 Función del VPN en el tiempo para los diferentes proyectos.	63
Grafico 9 Función del VPN para la granja Piedras Gordas.....	64

Lista de Anexos

ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS TRES MODELOS DE PLANTAS DE BIOGÁS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	71
A1.1. Datos.....	71
A1.2. Planta Centralizada de Gran Tamaño	73
A1.3. Planta Centralizada de Mediana Escala:.....	74
A1.4. Planta de pequeña escala Autogeneración:.....	76
ANEXO 2. DATOS Y ECUACIONES PARA CALCULAR LA PRODUCCIÓN DE EXCRETAS, BIOGÁS, Y ENERGÍA.....	77
A2.1. Datos recolectados en la granja.....	77
A2.2 Guía Chilena INLIA.....	79
A2.3. Guía para la Implementación de la Producción de Biogás UPME.....	80
ANEXO 3. FICHA TÉCNICA GENERADOR ELÉCTRICO	82
ANEXO 4. CENTRO DE GRAVEDAD	84
ANEXO 5. ANALISIS FINANCIERO	85
A5.1. Parámetros Financieros.....	85
A5.2 Resultados financieros plantas de Autogeneración.....	87
A5.2 Resultados financieros planta centralizada mediana escala.	88
A5.2.1 Planteamiento del modelo Matemático Binario de maximización del VPN.....	88
A5.2.1 Datos del modelo Matemático Binario de maximización del VPN para la planta de mediana escala.....	91

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con la finalidad, de evaluar la prefactibilidad para la generación de energía a partir de Biomasa residual, en cinco granjas de cerdo de una industria porcícola del Valle del Cauca. Para lo cual se evaluaron y compararon modelos de producción de energía, en otras partes del mundo, obteniéndose después de una revisión bibliográfica, la caracterización de tres modelos (pequeña, mediana y gran escala) que se diferencian en la escala de producción de energía y en la cantidad de toneladas de materia orgánica o sustrato capaz de tratar.

Igualmente se determinó el potencial de generación de energía para cada una de las granjas, así como la capacidad de generación de energía de una planta centralizada alimentada por todas las granjas, obteniéndose como resultado, que de los modelos caracterizados (pequeña, mediana y gran escala) se ajustarían a nuestras condiciones los modelos de pequeña y mediana escala.

Asimismo se revisó la legislación colombiana para ubicar los mecanismo legales que impactarían el desarrollo de los proyectos de generación de energía, tanto de pequeña como mediana escala, encontrándose que la clasificación de los proyectos dentro del marco legal colombiano sería de autogeneración y que tanto para los proyectos de autogeneración en las granjas como en la planta centralizada, la legislación los ubicaría dentro de plantas menores ya que la capacidad de producción en todos los proyectos sería menor a 20MW, igualmente se identificó que la venta de energía para los casos de autogeneración deben ser tramitada a través de un tercero que normalmente es el comercializador y que para el caso de Autogeneradoras se debe establecer una conexión al sistema de distribución local similar (SDL), con el cual el sistema estaría soportado y el excedente de energía producido podría ser vendido.

Una vez revisada la legislación y determinados los parámetros de afectación técnicos que impactarían los proyectos desde el marco legal, como los es disponer de un sistema de conexión al SDL, se determinaron de manera general los equipos necesarios y se realizó un diseño del sistema de conexión aplicable a los modelos estudiados.

Por último se evaluó la viabilidad financiera de la producción de energía para la autogeneración en cada granja y una planta centralizada, usando los criterios financieros VPN, TIR, TIRM, IR y PR, dando como resultado que los proyectos de autogeneración son factibles siendo el proyecto de una de las granjas (piedra gordas) el más viable, mientras que el modelo de planta centralizado resulta inviable debido al impacto en el VPN del costo operativo de transporte de los materiales a la granja centralizada.

INTRODUCCIÓN

En el último siglo la calidad ambiental en el mundo ha desmejorado a un ritmo acelerado, sin embargo, no fue sino hasta mediados de la década de los 60's que la concepción y visión del tema ambiental del planeta empezó a tener relevancia en el mundo entero; en un inicio los problemas ambientales fueron asociados fundamentalmente a la contaminación física y no como un problema inherente al desarrollo. En la década de los 80's la Comisión **Brundtland**, instituida por la Asamblea de Naciones unidas examino los problemas ambientales y formuló la recomendación que sirvió de base para la histórica reunión de Rio en 1992, en donde se reconoció la relación entre medio ambiente y desarrollo, y se planteó la idea de desarrollo sostenible como un objetivo deseable.

La actual situación ambiental que en gran parte es generada por el crecimiento de las industrias, ha hecho que tanto la normatividad ambiental como los clientes, sean más exigentes con la industria, encaminándolas en la difícil tarea de acceder a operaciones más limpias, esto ha conllevado a la necesidad de que las industrias no solamente inviertan en mejorar sus procesos productivos, si no en hacerlos ambientalmente sostenibles, y el sector colombiano agroindustrial no es la excepción (Cherubini, 2010).

Para el caso de la explotación porcina a nivel industrial, la implementación de tecnologías adecuadas para el tratamiento de las excretas ha surgido como una necesidad real del sector, ya que la concentración de grandes volúmenes de las excretas generadas por día hace imposible su uso como corrector edáfico, ocasionando un problema ambiental desde el punto de vista de la eutrofización acuática; es por este motivo que las plantas de producción intensiva, realizan diferentes tratamientos con la finalidad de degradar la Biomasa producida (excretas).

Una de estas tecnologías usadas en las plantas a nivel mundial, y que gracias a su fácil implementación, es usada en las empresas del sector porcícola en Colombia, tiene que ver con la producción de Biogás a través de un proceso anaeróbico, ya sea en digestores o en lagunas anaeróbicas, en este proceso el material orgánico es degradado, obteniéndose un producto denominado Biogás, el cual es susceptible de utilización en la producción de energía térmica o eléctrica (Gebrezgabher, Meuwissen, Prins, & Oude, 2010), con lo cual se intenta disminuir el impacto ambiental a la vez que se disminuye los costos de producción en las granjas, sin embargo a nivel nacional la implementación del biogás para generación eléctrica no es una práctica común, por lo que en la mayoría de los casos el Biogás generado es quemado o usado en ciclos térmicos.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Contexto Del Problema

La expansión económica de Colombia durante la última década ha favorecido el crecimiento en diferentes sectores económicos, tales como el porcicultor, el cual refleja dinámicos en el aumento sostenido de la población durante los últimos años, actualmente “Colombia cuenta con una población porcina cercana a los 4.610.453 animales, distribuidos en 201.098 predios. Estos animales se encuentran localizados principalmente en los departamentos de Antioquia (35,54%), Cundinamarca (10,60%) y Valle del Cauca (9,04%), en estos departamentos se concentra cerca del 55,18% de la población nacional”.(Porcicultores, 2014)

Tabla 1 Inventario Poblacional Ganado porcino 2009 -2015 datos ICA

AÑO	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DATOS							
Inventario Nacional ganado porcino (millones)	3,816	3,798	3,919.	3,938	3,920	4,237	4,610
porcentaje de crecimiento o decrecimiento		-0,5%	3,1%	0,5%	-0,5%	7,5%	8,1%

El proyecto “*Estudio de prefactibilidad para la generación de energía a través de biomasa en granjas de cerdo de una industria porcícola*” plantea la realización de un estudio sobre el aprovechamiento de los desperdicios sólidos de la producción porcícola (Biomasa), para la producción de energía de tal manera que se mitigue el impacto ambiental asociado a vertimientos y de igual manera se obtenga un subproceso productivo que genere ingresos a la compañía o por lo menos reduzca gastos.

Existen innumerables estudios que soportan la factibilidad del aprovechamiento de los residuos de granjas porcinas (Biomasa), ya sea para producción de Biogás (Bioetanol), abono o correctores edáficos; como se mencionó anteriormente el interés primario es la producción de Biogás para su conversión a energía eléctrica, en este sentido la Unión europea (UE) es el líder mundial en aprovechamiento de Biomasa, sobre todo en países como Alemania, Reino Unido, España, Holanda e Italia, y en donde se cuenta con innumerables casos de éxito en estos países para su implementación(Cerdá Tena, 2011).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la generación eléctrica a partir de Biomasa dado el bajo poder calorífico de esta, precisa de centrales específicas con costos

elevados, con lo que las inversiones iniciales para este tipo de aprovechamiento son de un alto costo, no obstante debido a la estabilidad en el suministro de la materia prima para su generación en el sector que estamos estudiando genera garantías de suministro en cualquier momento e independiente de las condiciones meteorológicas (Industrial, 2011), por tanto se puede decir que a diferencia de otras tecnologías de energía renovable esta cuenta con un carácter gestionable, aunque dista mucho de ser una tecnología 100% evolucionada, lo anterior sumado a los ahorros en gases de efecto invernadero de un 80% en comparación con los combustibles fósiles (Aune, Marit Dalen, & Hagem, 2012) y la posibilidad de mitigar el impacto ambiental por vertimiento en la industria, hacen de este tipo de proyecto, de un gran atractivo para la industria.

1.2. Análisis Y Justificación

Para el caso de Colombia la política económica proteccionista, que rigió al país hasta los años 90's favoreció el desarrollo industrial, bajo características de baja producción, tecnología obsoleta, uso inadecuado de recursos naturales, entre otros, produjo un impacto negativo ambiental durante casi 6 décadas. Dentro de los problemas ambientales generados, uno de los más preocupantes es la contaminación hídrica por vertimientos, siendo Colombia un país rico en recursos hídricos, es preocupante que menos del 5% de las aguas residuales sean tratadas, esta mala práctica ha conducido a que la contaminación hídrica del país sea lo bastante alta para considerarse alarmante, en este tema los residuos agrícolas y ganaderos aportan la mayor contaminación.

Los residuos de las producciones agroindustriales son lavados por nuestros ríos ocasionando una elevación del material orgánico, nitrito, nitratos y fosfatos, afectando la DQO (demanda química de oxígeno), además de favorecer la aparición de patógenos afectando el ciclo natural del agua.

La industria porcina en Colombia ha experimentado un crecimiento en el mercado nacional durante los últimos años gráfico 1, esto sumado a la incursión en mercados como el ecuatoriano y venezolano, ha conllevado a la mejora y tecnificación de las granjas; una de estas mejoras es el empleo de sistemas de limpieza con agua a altas presiones para facilitar el arrastre de excrementos y mejorar de esta forma las condiciones higiénicas y sanitarias de la granjas, sin embargo esto implica un gran consumo de agua y la complicación del manejo del purín ya que este queda en un estado semisólido con un alto contenido de agua (aproximadamente un 95%).

En granjas rurales, sin tecnificación y debido a los pequeños lotes que se manejan, el problema del residuo "purín", se resuelve utilizándolo como corrector edáfico al interior de la misma granja, sin embargo en las granjas tecnificadas, la gran cantidad de purín "aproximadamente 25.000 cabezas por granja en donde aproximadamente cada

cerdo produce entre 5 y 7 Litros de purín”, y el alto contenido de nitrógeno del purín, hace que sea inviable su uso como corrector edáfico directo, puesto que la acumulación de estos residuos satura el suelo con nitritos y nitratos los cuales se difunden a través de la tierra hasta llegar a los canales de agua subterráneos y por ende alcanzar las redes de aguas potables y de riego, causando problemas en la industria agrícola y la salud humana. La OMS advierte sobre la peligrosidad de que el agua contenga 25 mg/L, sin embargo en estudios en España se ha detectado en zonas cercanas a las granjas concentraciones de hasta 50mg/L (Eutrofización acuática), por tal motivo se debe implementar tecnologías y metodologías alternas para su tratamiento.

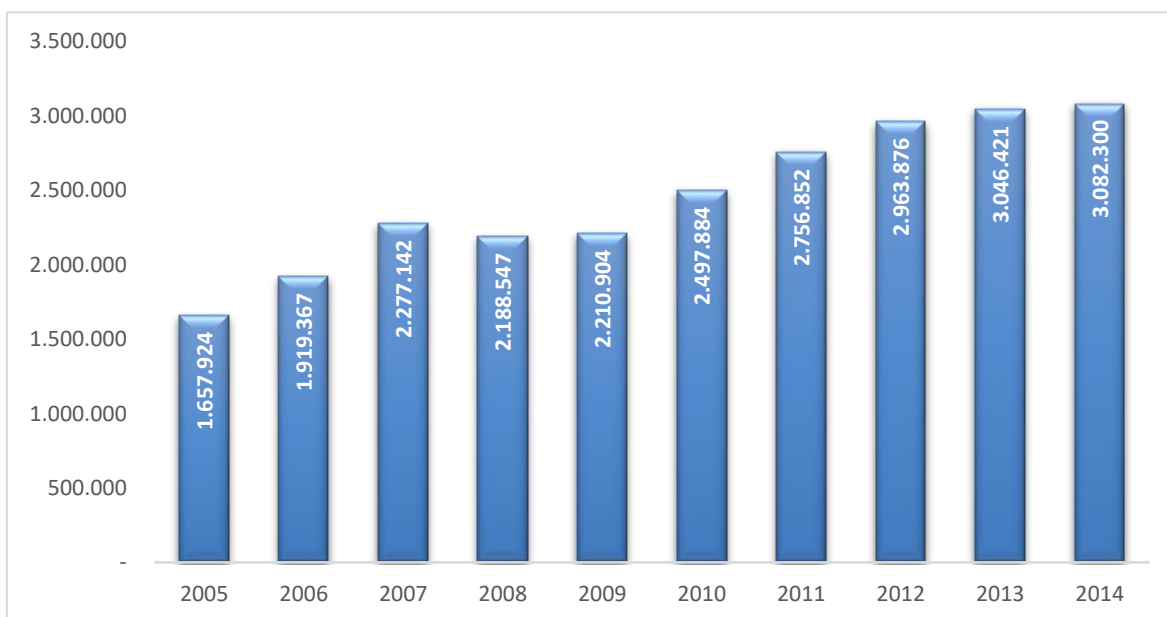


Grafico 1 Proyección Beneficio Porcino Anual (cabezas)

Fuente: (Sistema Nacional de Recaudo, Asociación Colombiana de Porcicultores - FNP.)

1.3. Formulación Del Problema

Desaprovechamiento por parte de la industria porcícola del biogás producido con el tratamiento de los residuos orgánicos (excretas), para la producción de energía eléctrica (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015), con lo cual se esperarían prácticas ambientales más limpias y reducción de costos de las granjas por generación de una nueva unidad de negocios.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar el potencial de desarrollo e implementación del uso de energías no convencionales en la región.

2.2. Objetivo del Proyecto

Evaluación de pre factibilidad para generación de energía eléctrica a partir de Biomasa residual, en cinco granjas de cerdo de una industria porcícola del Valle del Cauca.

2.3. Objetivos Específicos

1. Evaluar y comparar modelos para producción de energía a través de la transformación de la Biomasa en las granjas.

Entregable:

- ✓ Descripción de los modelos de producción de energía con biogás que se han implementado exitosamente, y aplicables para la empresa, según las granjas objeto del estudio.
2. Determinar el potencial de generación de energía para cada una de las granjas.

Entregable:

- ✓ Estimación de la generación de energía eléctrica para cada granja.
 - ✓ Estimación del máximo de producción de energía eléctrica, para una planta al usar la materia prima de todas las granjas y localización de dicha planta.
3. Determinar los mecanismos técnicos, legales de la entrega de energía al gestor de la red eléctrica y evaluar la viabilidad financiera de la producción de energía de la biomasa.

Entregable:

- ✓ Identificación de los obstáculos potenciales (normativos y técnicos) para la implementación de los proyectos
- ✓ Análisis financiero de los modelos implementados, según los indicadores financieros VPN, TIR, TIRM, IR Y PR

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Antecedentes o Estudios Previos

A nivel mundial existe la voluntad de generar energías más limpias, con el fin de mitigar los impactos ambientales producto de esta, la migración hacia una conciencia ambiental mayor es una realidad y las empresas entienden que este puede ser un nicho de mercado, es por tal motivo que durante las últimas décadas se han desarrollado tecnologías para el aprovechamiento de los residuos industriales; particularmente para este trabajo se centrara en el aprovechamiento de la Biomasa residual en una empresa del sector porcícola, para la generación de Biogás y posterior generación de energía eléctrica.

En general, para cualquier combustible, la generación de electricidad típicamente tiene una eficiencia de conversión directa del 35%, lo cual significa que el 35% del contenido en energía primaria se convierte en electricidad (energía final). La producción de electricidad a partir de biomasa precisa de sistemas complejos dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. Para ello se necesitan centrales específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran combustibles convencionales, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento. Todo ello, unido a la dificultad de aprovisionamiento de la biomasa, hace que tenga menor peso la biomasa eléctrica que la biomasa para usos térmicos en el cómputo global de esta energía.

Se consultaron tanto una investigación realizada por Keri B. Cantrell , Thomas Ducey, Kyoung S. Ro, Patrick G. Huntel, quienes pertenecen al grupo investigación de suelo costero, agua y plantas del departamento de agricultura de estados unidos “Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities” como a P. Venkateswara Rao, Saroj S. Baral, Ranjan Dey , Srikanth Mutnuri, pertenecientes al grupo de ingeniería química del instituto de Ciencia y tecnología de Birla en india, “Biogás generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India”

Ambas investigaciones se relacionan al presentar la primera, un panorama técnico sobre la producción y conversión del biogás de energía a través de tecnologías de conversión termoquímica (TCC) y biológica, y la segunda el potencial de desarrollo de la generación de energía desde un punto de vista teórico según los diferentes tipos de Biomasa aplicado a un país. Estos estudios orientan la presente investigación ya que presentan información plausible sobre los procesos y sus capacidades dentro de los ciclos de producción teniendo en cuenta factores como el tipo de biomasa, y su logística, al mismo tiempo presenta nuevas opciones en la conversión de la biomasa en el gas y la producción de energía.

El trabajo correspondiente a Erick León y Mariano Martín (2016) “Optimal Production of power in a combined cycle from manure based biogás” aborda un modelo para la producción de energía, con biogás como combustible obtenido a partir de desechos de

cerdo, el trabajo se centra en la producción de energía usando un ciclo combinado de Turbina de gas/Turbina de Vapor; para evaluar el modelo se usó programación no lineal de variables binarias la cual se corrió en GAMS, este modelo permitió establecer una producción de 2.6MW con una inversión de 26 millones de euros y un coste de producción de 0.35 €/kWh para una planta que procesa 10Kg/s de purín.

La investigación anterior invita a profundizar diferentes aspectos relacionados con el balance de materia y los ciclos de secado así como abre la posibilidad para ahondar en tecnologías de mejoramiento en la producción y calidad del biogás para su uso como combustible en la generación eléctrica.

Por otro lado el “Renewables 2015 Global Status Report” elaborado por el REN21, y la “Leitfaden Biogas” producto del ministerio federal Alemán de cooperación económica y desarrollo, permite obtener diferente información sobre la producción de la energía de la biomasa en el mundo, así como una guía completa de la producción y uso del biogás ya sea que este último se destine para energía o calefacción, igualmente el último trabajo contiene un paso a paso en un proceso para el montaje de los proyectos para plantas de producción de biogás.

Ambos trabajos permiten tener un acercamiento en la realización de un proyecto de la envergadura que se propone ya que adicional a la parte técnica considera los factores económicos, sociales y legales de dicho proyecto, cabe resaltar que la UE tiene un desarrollo importante en la producción de energías renovables y que tanto el reporte como la guía son fruto de sus experiencias en más de cuatro décadas en la producción de energías renovables.

Por último se encuentran dos informes realizados por la Unidad de planeación Minero energético de Colombia “Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia” y el “Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050”. Ambos informes permiten tener un acercamiento, sobre las políticas y proyecciones del gobierno en el tema de energías renovables en especial la generada a partir de Biomasa, igualmente ofrece una exhaustiva investigación sobre las barreras a las que se afronta en este tipo de proyectos, lo cual hace valioso el estudio para el trabajo de grado, puesto que las mayoría de los estudios realizados y sobre los que se encuentran publicaciones se encuentran en países desarrollados en donde los factores exógenos al proyecto son muy distintos.

3.2. Marco Teórico.

3.2.1. Industria Porcina.

El objetivo principal de toda industria es brindar un producto de alta calidad, con la mayor rentabilidad posible, en este orden de ideas la industria porcícola no es la excepción. En Colombia hasta hace unas cuantas décadas la producción de cerdo se realizaba a pequeña escala en fincas ubicadas en zonas rurales “Sistema de Producción Extensivo”, y en los límites de las principales ciudades colombianas “Sistema de Producción Semi-extensivo”, el interés de estos pequeños criaderos era satisfacer el autogeneración, y su demanda estaba sometida a la disponibilidad de los productos en el mercado; en estas condiciones los cerdos no tenían una producción organizada que explotara todas las oportunidades de este sector en crecimiento. Realmente a finales de la década de los 80’s, es que este sector comienza con su industrialización al crearse las primeras granjas de gran tamaño “Sistema de Producción Intensivo”, así como la importación de razas de cerdo para aumento de la producción en carne.

Con la industrialización del sector su atención se centró en el mejoramiento de la producción, para esto se importaron nuevas líneas genéticas y se mejoraron las instalaciones con lo cual se optimizaron los ciclos reproductivos, se controlaron las enfermedades y en general se mejoró la productividad y calidad del producto. Actualmente en Colombia la mayor presencia de industria porcícola, se presenta en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Valle, con el 52% de la producción nacional de cerdos Anexo 1.

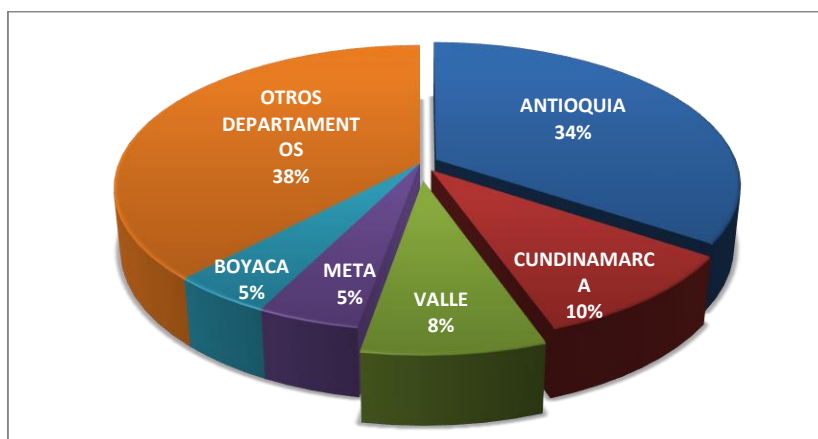


Grafico 2 . Porcentaje Cabezas de Porcino por Región
Fuente ICA (ICA, 2016), elaboración Propia

3.2.1.1. Ciclo de Producción Porcina

Si bien el objetivo de criar cerdos es la obtención de carne para su consumo ya sea a través de productos frescos o madurados, el ciclo productivo refleja dos sistemas uno reproductivo y otro de producción y destajo. El primero se refiere a la crianza y renovación de materia prima y el segundo a la transformación de esta materia prima en producto final. En las granjas donde ambos sistemas convergen en un mismo espacio

físico se denominan de “ciclo cerrado”. En la siguiente figura podemos observar el sistema de producción de una granja de ciclo cerrado el cual es el sistema de mayor interés para el presente trabajo.

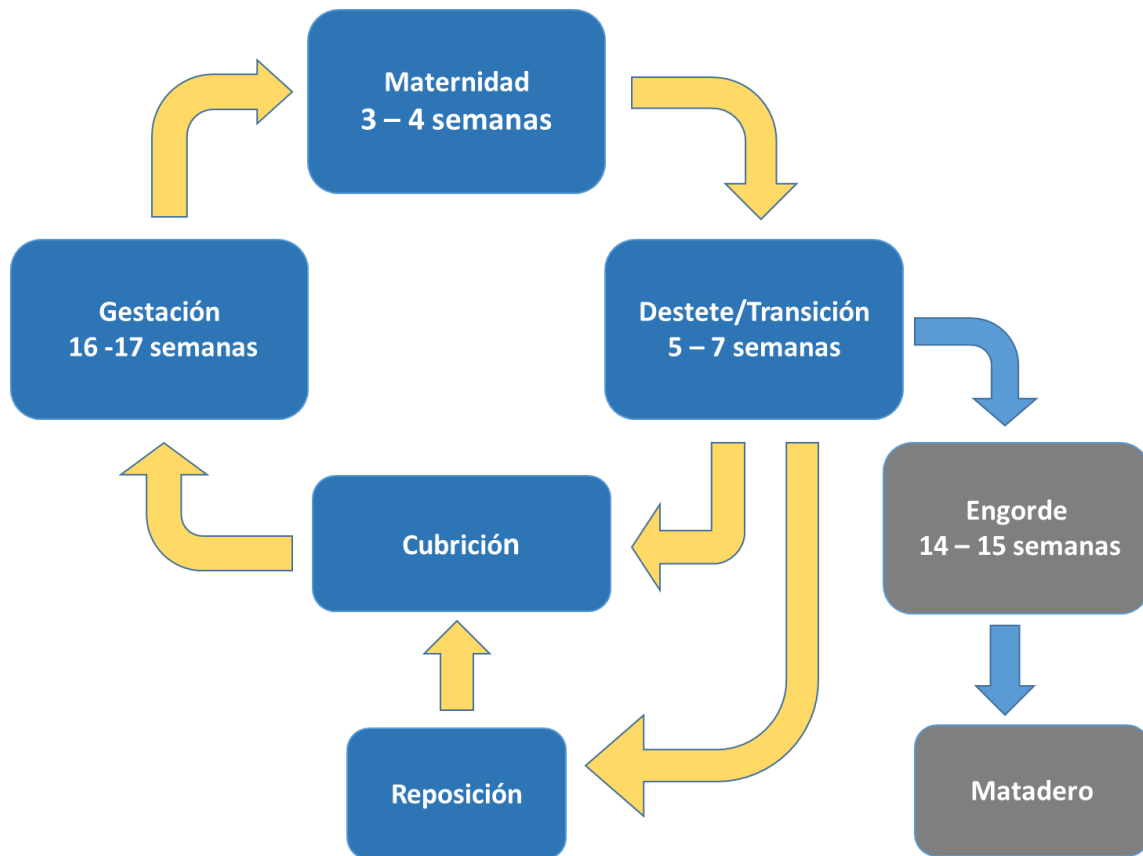


Figura 1 . Sistema productivo de ciclo cerrado

Fuente: (Paramio, Teresa; Piedrafita, Jesus; Mateu, Enric, 2014) elaboración Propia

El proceso comprende 3 etapas claves y comprende un periodo de entre 38 y 43 semanas:

1. **Producción del Lechón**, el cual abarca la cubrición (inseminación), Gestación y Maternidad (parto y lactancia) el cual es un proceso que dura aproximadamente entre 20 y 22 semanas.
2. **Destete/ Transición** de 5 a 7 semanas, es el subproceso en el que el lechón es destetado y aislado, se inicia una dieta diferente con un iniciador, en este periodo el lechón puede tomar dos vías la primera es reposición, aquí las cerdas no gestantes, ya sea por término de su vida fértil, enfermedad o muerte son reemplazadas por las nuevas generaciones; la segunda vía consiste en pasar a la siguiente etapa que es el engorde.

3. **Engorde**, el lechón es cebado durante aproximadamente 14 semanas en las que adquiere el peso ideal (100Kg) para enviarlo al matadero.

Para un sistema de producción intensiva, se deben considerar ciertas particularidades con respecto a sus instalaciones, ya que en este sistema se tiene una alta densidad de animales en un espacio reducido, las instalaciones deben proporcionar a los animales el máximo confort, para así obtener un producto de alta calidad, sin embargo, adicional a la inversión primaria los sistemas de producción intensiva, cuentan con un importantes gastos de mantenimiento (consumo de energía, Agua y reparaciones, con lo cual los costos de inversión solo son posibles para una industria estructurada. (Colin, 1996).

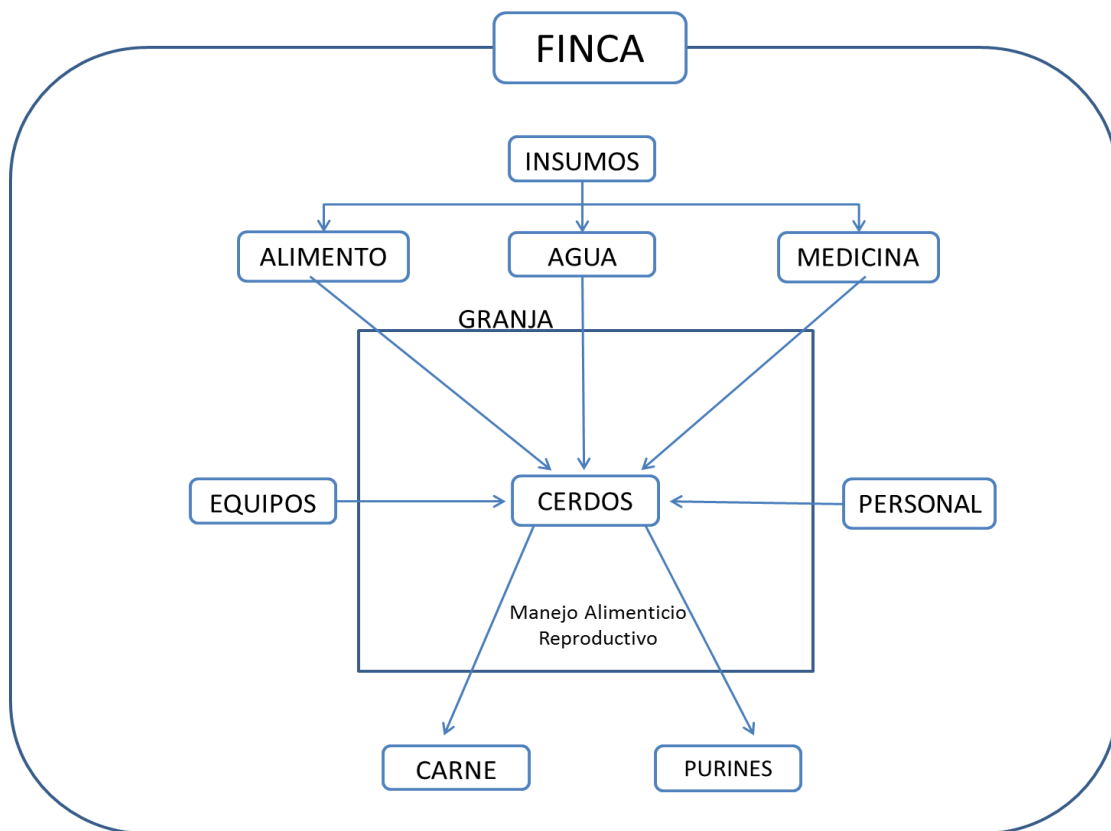


Figura 2 Componentes de un sistema de producción intensiva
Fuente: elaboracion propia

3.2.1.2. Purines

Como se observa en la Figura 2. De la producción porcina se obtienen dos productos, la carne o el producto deseado y las excretas o residuos orgánicos denominados purín

producidos por el cerdo. El purín se compone de las heces y orines expulsados por el cerdo y están constituidos por la fracción de alimento ingerido que no asimilo el sistema digestivo; en los sistemas de producción intensiva los purines vienen acompañadas de una gran cantidad de agua, debida a los procesos de limpieza de la granja.

La producción de purín y su composición varían dependiendo de los siguientes factores, instalaciones, alimentación y tipo de animal, y es que en gran medida las excretas dependen de la capacidad del animal para fijar ciertos nutrientes, así como de la calidad y composición del alimento, igualmente estos dos factores en conjunto con el clima y sistema de limpieza de la granja afectan la producción o cantidad de purín a manejar, sin embargo existen gran cantidad de referencias sobre las características principales del purín las cuales se observan en la Tabla 2, y de la cantidad de producción de purín por día según el estadio del cerdo como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 2. Caracterización purín de cerdo (Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, 2005)

Parámetros	Valores
% Humedad	90%
pH	6 – 8
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) x cada 100Kg de peso	0.25 Kg
Demanda Química de Oxígeno (DQO) x cada 100Kg de peso	0.75 Kg

Tabla 3 Producción estimada Diaria de Excretas según el tipo de Cerdo (DOURMAND, 1991)

Etapa	Estiércol kg/día	Est. + orina kg/día	Volumen L/día	Volumen m3/animal/mes
25-100 kg	2.3	4.9	7.0	0.25

Hembra	3.6	11.0	16.0	0.48
H. lactación	6.4	18.0	27.0	0.81
Semental	3.0	6.0	9.0	0.28
Lechón	0.35	0.95	1.4	0.05
Promedio	2.35	5.8	8.6	0.27

3.2.2. Aspectos Generales de la Producción De Biogás.

Tradicionalmente el manejo de los residuos orgánicos producto de actividades porcícolas, se ha realizado a través del compostaje de los residuos, para la obtención de un corrector edáfico (porquinaza) el cual usualmente es utilizado en tierras cultivables, sin embargo este manejo se puede realizar solamente con la fracción solida (FS) de los residuos. No obstante, cuando la actividad porcicola se industrializa, se crea un nuevo problema al añadirse un nuevo desperdicio de difícil manejo como es la fracción líquida (FL) o lodos, producto del lavado de las porquerizas.

Desde hace algunas décadas la FL pueden ser tratada con un sistema similar al del compostaje, “Biodigestion Anaeróbica”, el cual es un proceso natural de descomposición de la materia orgánica llevado a cabo por microorganismos del genero arquea y que se desarrolla en distintos parajes tales como paramos, lagunas, lagos entre otros donde las condiciones ambientales son propicias para su producción.

La Biodigestion anaerobia comprende 4 etapas Figura 3. “Hidrolisis, Etapa fermentativa o Acidogénica, Etapa Acetogénica y Etapa Metanogénica”, donde se garantiza la degradación de la materia (residuos) y su conversión en un subproducto aprovechable denominado BIOGAS el cual es una mezcla gaseosa, las características principales del biogás se presentan en la Tabla 4. (Seagren, Levine, & Dague, 1991)

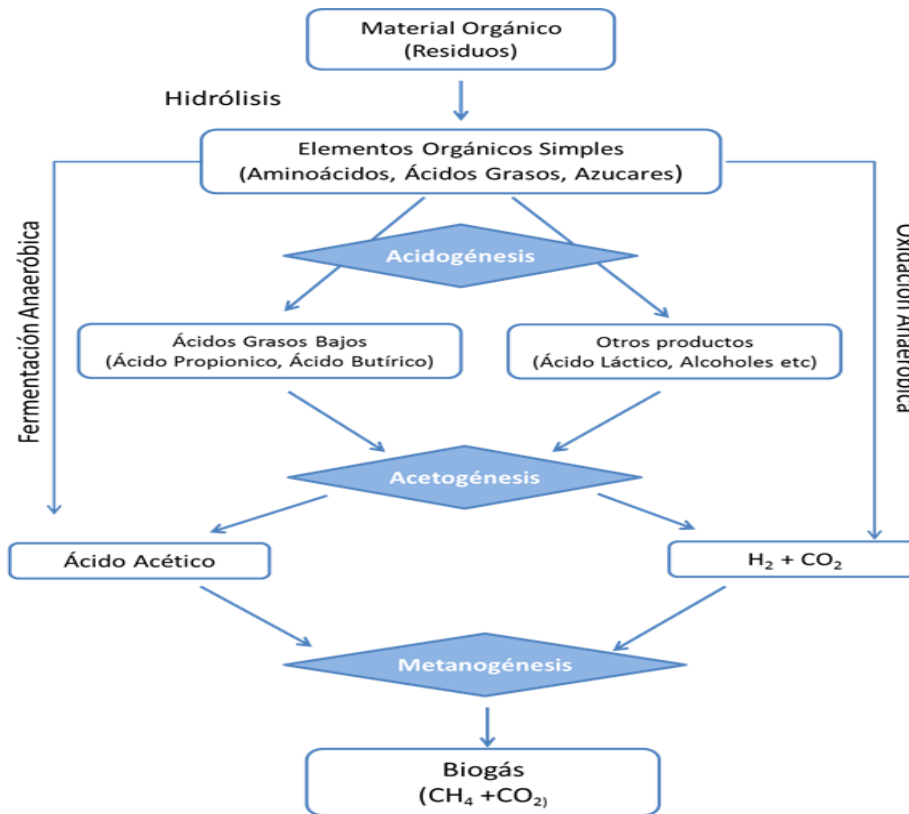


Figura 3 Ciclo de producción de Biogás por Digestión Anaerobia
Fuente: (E.V., 2010) elaboración propia

Tabla 4. Caracterización del Biogás

Parámetros	Valores
Composición	Metano (CH ₄) 50 -75%. Dióxido de Carbono (CO ₂) 25% - 50%, y trazas de Hidrogeno (H ₂), sulfuro de hidrogeno (H ₂ S), Amoniac (NH ₄) y otros Gases
Densidad Molar	1.2Kg/m ³
Contenido Energético	6.0 -6.5 Kw.h/m ³
Temperatura de ignición	650 - 750oC
Olor	Sulfurado, una vez se elimina el H ₂ S, es inodoro
Presión Crítica	74 - 88 atm.

Es importante recordar que este proceso se realiza en condiciones de ausencia de oxígeno, por lo que la presencia de este elemento es perjudicial para el proceso, existen dos factores que afectan el proceso de producción del Biogás y que al igual que el oxígeno deben ser controlados para que el proceso sea lo más eficiente posible, estos factores son el pH y la Temperatura, el primero debe estar lo más cercano posible a 7, mientras que el segundo debe ser mayor a 15°C (Yuan & Zhu, 2016).

Aunque todo residuo orgánico es susceptible de transformación en biogás, el rendimiento de producción y la composición del Biogás varía dependiendo del contenido del tipo de materia orgánica véase la Tabla 5; igualmente para un mismo tipo de desecho orgánico, la producción del biogás puede variar, ya que como vimos anteriormente las excretas de los cerdos van a depender de diversos factores, que pueden condicionar la producción del biogás.

Tabla 5 Rendimiento del Biogás dependiendo del tipo de purí(E.V., 2010)

Sustrato	Rendimiento de Biogás m ³ /ton	Rendimiento de metano m ³ /ton	Rendimiento específico de metano según VS m ³ /ton
Lodo Liquido de Ganado	20 - 30	11 - 19	110 - 275
Lodo Liquido de Cerdo	20 - 35	12 - 21	180 - 360
Bosta de Ganado	60 - 120	33 - 36	130 - 330
Bosta de Ave	130 - 270	70 - 140	200 - 360

3.2.2.1. Producción de Biogás.

En términos de la operación de producción del biogás, una planta de biogás cuenta con 4 pasos que son transversales a todos los mecanismos, tecnologías o procesos de producción de Biogás, los cuales se describen a continuación (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2010):

1. **Manejo de la Materia prima (Residuo Orgánico):** en esta parte del proceso se describe la logística y almacenamiento de los residuos, los cuales dependerán del tipo y el estado del residuo (sólido o líquido).
2. **Producción del Biogás y fase del reactor:** Para la producción de Biogás existe un sinnúmero de tecnologías y combinaciones, sin embargo para este trabajo nos

centraremos en el sistema de producción de Biogás por biodigestores o reactores anaeróbicos, los cuales son especializados para el tratamiento de sustratos con alto contenido de solidos tales como los purín de cerdo, dentro de estos equipos podemos diferenciarlos según el tipo de tratamiento anaeróbico los cuales pueden ser de película fija o de biomasa suspendida, igualmente estos últimos pueden subdividirse en biodigestores de mezcla completa o de pistón; según el tipo de alimentación existen los de flujo continuo, semicontinuos o intermitente, en especial se mencionaran dos biodigestores, de tipo continuo:

- a. **Biodigestor Tipo Taiwán:** es uno de los biodigestores más difundidos, debido a la sencillez y bajo costo, de fabricación; este biodigestor consiste de una membrana sintética tubular horizontal, la cual puede ser de polietileno (PE) o de PVC, esta membrana se coloca en una zanja con una inclinación mínima la cual permite el desplazamiento del material digerido, dentro de las desventajas que presenta este sistema es que su vida útil es corta aproximadamente 5 años, por otro lado el sistema no permite crecer con un mismo digester por lo que se debe crecer en área ya que no es viable tener digestores de más de 50 m de largo(Forget, 2011).



Figura 4 Digestor Tipo Taiwan
Fuente: elaboracion propia

- b. **Laguna de Oxidación:** Normalmente pueden ser una combinación de sistemas anaeróbico, facultativo y aeróbico, sin embargo nos centraremos en

la laguna anaeróbica, la cual puede ser de baja o mediana profundidad tapizadas de una membrana de polietileno en donde desemboca el material a digerir, y la cual es cubierta después por una geomembrana de PVC, donde se almacena el Biogás producido por la Metanogénesis que se producen en su interior; dentro de las ventajas que tiene este sistema es que aunque su costo de inversión es un poco alto, no requieren demasiada inversión en mantenimiento y el control de parámetros como temperatura, cantidad de oxígenos disuelto entre otros es mas fácil de mantener estable; adicional cuenta con la ventaja de que su vida útil es de largo plazo aproximadamente 10 años, se puede escalar y su producción de biogás es mas alta debido a la tasa de degradación ya que la materia orgánica se mineraliza en su totalidad debido a la deposición de esta.



Figura 5 Laguna de Oxidación Anaeróbica
Fuente: elaboración propia

- 3. Almacenamiento y uso del digestato:** Una vez se ha realizado el proceso de fermentación existen dos productos el biogás y el digestato o residuo líquido de la producción, la cual es la fracción de materia orgánica que no alcanzo la digestión completa, este digestato es similar al vermicompost y cuenta con características como biofertilizante, con lo cual es aplicable a las tierras arables.

4. **Almacenamiento y tratamiento del Biogás:** debido a que la producción de gas fluctúa teniendo periodos de alta producción y otras de baja producción, ya que esta dictado por el metabolismo de microorganismos; y que la alimentación de biogás para producción eléctrica debe ser continuo; esto obliga al almacenamiento del biogás de una manera apropiada; existen diferentes tipos de tanques de almacenamiento, estos pueden ser internos o externos dependiendo si están integrados o no al reactor, de presión alta o media dependiendo de la presión.

Como se mencionó en el apartado anterior, el Biogás en su mayoría está compuesto por CH₄ y CO₂, sin embargo las trazas de otros gases en especial del H₂S, y el alto contenido de humedad presente complican el uso del biogás, es por estas razones que antes de su uso el biogás, debe pasar por procesos de desulfurado y secado; en la Tabla 6 se presentan los métodos de desulfuración más utilizados.

Tabla 6 Métodos de desulfuración(E.V., 2010)

Método	Pureza en ppm	Problemas
Desulfuración biológica en el digestor	50 – 200	Control impreciso del proceso
Desulfuración biológica externa	50 – 100	Control Impreciso del proceso
Biolimpiador	50 – 100	Alto Costo y complejidad del proceso
Precipitación del sulfuro	50 – 500	Proceso Lento
Desulfuración Mecánica	1 – 100	Disminuye enormemente el efecto de purificación
Carbón Activado	<5	Grandes Volúmenes de disposición

Una vez obtenemos el Biogás purificado este puede usarse en diferentes procesos tal como lo muestra la figura 4, sin embargo cabe anotar que dependiendo del proceso en que se utilice el biogás su calidad varia, siendo de mayor calidad el que se usa para red doméstica.

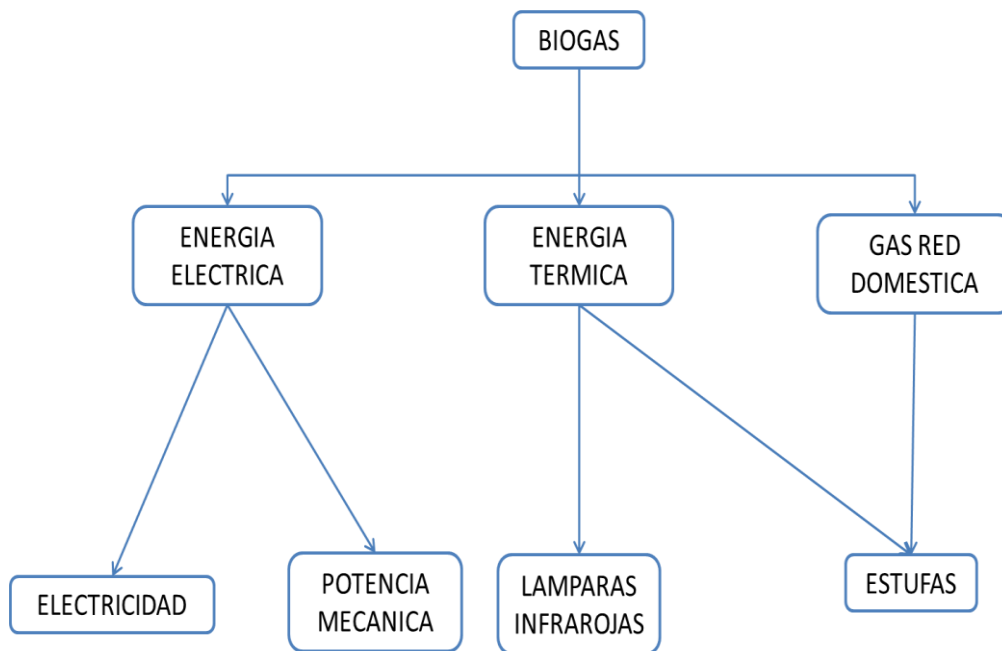


Figura 6 Posibles usos del Biogás
Fuente: elaboracion Propia

3.2.3. Conversión de Biogás a electricidad

Como se observó en la figura 4, el biogás puede ser usado para diferentes propósitos, generación de calor, generación energía eléctrica, en menor escala para inclusión en la red doméstica de gas, y por ultimo generación de calor y energía “cogeneración”. (Waqar, B., Neelofar, & Muhammad, 2015); En varios artículos se hace referencia a la cogeneración como la forma más eficiente de aprovechamiento del biogás ya que se puede alcanzar al usar el ciclo de Brayton y el ciclo de Rankine (Leon & Martin, 2016), para la producción de energía y calor alcanzando eficiencias del 30 al 43%. En este tipo de tecnología se aprovecha la potencia mecánica de un motor para alimentar un generador, de esta manera se genera la electricidad, el calor generado en este proceso por la combustión del gas se recupera a través de intercambiadores de calor (agua y aceite) para ser usado, de esta manera se disminuye la perdida de la energía potencial del biogás.

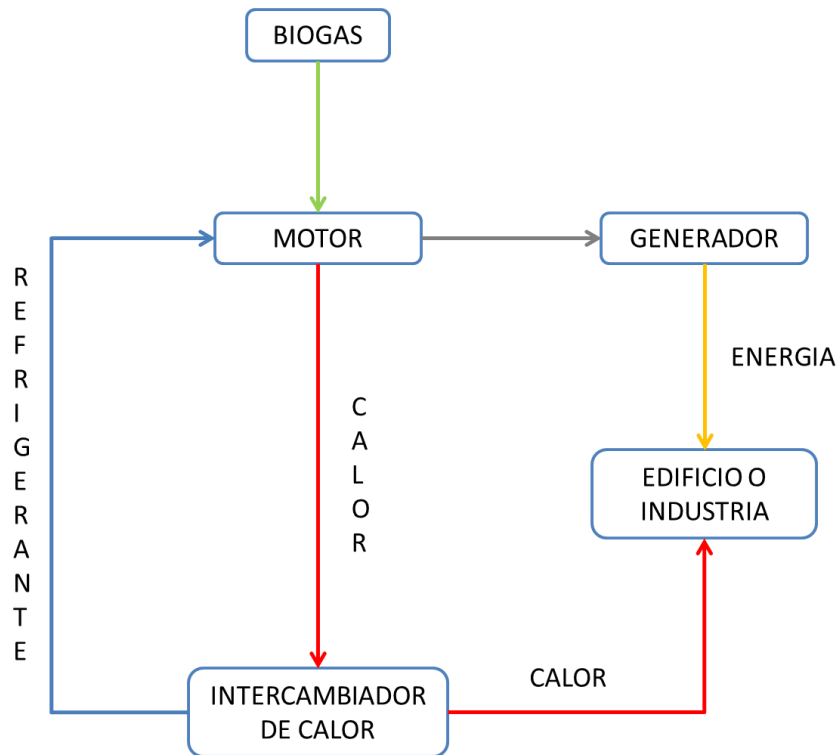


Figura 7 Esquema Básico para uso del biogás

Fuente: elaboración propia

A continuación se describen cada uno los tipos de motores que se pueden utilizar para la generación de energía dentro del proceso mostrado en la figura 5.

1. **Motor de ignición:** existen dos tipos de motores de ignición por chispa y piloto. El motor de ignición por chispa, se considera para plantas con producción media menor a 300kW, su eficiencia es de 34 - 42% y tiene una vida útil de 60.000 horas, está diseñado para funcionar con Biogás. Por otro lado, el motor de ignición por piloto tiene una eficiencia de entre 30 -44%, normalmente es inferior a la de los motores de ignición con chispa, tiene una producción media superior a los 340kW, su vida útil es mucho más corta 35.000 horas y su diseño no es específico para uso de Biogás, por lo que los costos de mantenimiento se pueden incrementar, cabe destacar que es importante cumplir con las normatividades de emisión de gases, en lo cual el motor de ignición por piloto tiene niveles más bajos de emisión que el motor de ignición por chispa. (Wojciech M, 2015)
2. **Motores Stirling:** son motores con baja emisión de gases y baja emisiones sonoras, sin embargo la eficiencia eléctrica es muy baja 24 - 28 %, al ser un motor de expansión sus costos de mantenimiento son mucho más bajos, su

producción media está por debajo de los 100kW, una característica importante de este tipo de motores es que la combustión se realiza externamente el gas utilizado no es necesario purificarlo, con lo cual se reduce el costo dentro de un proyecto. (Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit, 2010)

3. **Microturbinas a Gas:** esta tecnología es reciente y está en desarrollo por lo que es un poco más costosa que las anteriores, su eficiencia es relativamente baja menor al 30%, sin embargo es compensado por en sus costos de mantenimiento mucho más bajos, así como su vida útil que es de 60.000 horas, adicional a esto el calor residual generado por la combustión es más alto que en los motores, por lo que la eficiencia térmica para su potencial uso aumentaría.

3.2.4. Marco Legal Colombiano

A continuación se relaciona la normatividad vigente nacional en lo que se refiera a generación, almacenamiento y producción, así como los componentes ambientales para este proyecto.

Tabla 7 Matriz Legal

REGULACION	IMPACTO
<ul style="list-style-type: none"> • Resolución 619 de 1997 (Ministerio de Medio Ambiente – MMA) • Resolución 058 de 2002 (Ministerio de Medio Ambiente – MMA) 	Emisiones de gas
<ul style="list-style-type: none"> • Decreto 1594 de 1984 • Decreto 3930 de 2010 • Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Medio Ambiente – MMA) 	Vertimientos a aguas superficiales y alcantarillado
<ul style="list-style-type: none"> • Ley 9 1979 	Medidas sanitarias control y regulación
<ul style="list-style-type: none"> • Ley 1715 de 2014 • Ley 142 y 143 de 1994 	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.
<ul style="list-style-type: none"> • Ley 1215 de 2008 • Resolución 070 de 1998 - CREG • Resolución 24 de 2015 – CREG • Resolución 106 de 2006– CREG • Resolución 025 de 1995 – CREG 	Por medio de la cual se regula la actividad de generación y venta de excedentes.

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Resolución 281 de 2015 – Ministerio de Minas<ul style="list-style-type: none">• Decreto 3172 de 2003 – CREG• Decreto 2532 de 2001– CREG• Resolución 024 de 2015 – CREG• Resolución 106 de 2006 – CREG | |
|--|--|

3.3. Aporte Critico

De acuerdo con los conceptos planteados a través del marco teórico, la producción de biogás a partir de diferentes residuos orgánicos para su posterior conversión en calor y energía, es un proceso bastante conocido y estudiado a nivel mundial en donde existen diferentes casos de éxito, siendo los países de la UE, los que más han implementado esta tecnología.

En Colombia existen casos puntuales para el aprovechamiento de biomasa, sobre todo para la producción de calor, siendo la industria azucarera la única en donde se produce energía. Según estudios de la unidad de planeación minera y energética de Colombia (UMPE), el potencial de generación en Colombia para el sector porcícola es 4.308 TJ/año (Unidad de Planeacion Minero energetica, 2016).

Al analizar el contexto nacional, se evidencia la importancia de realizar acercamientos con las industrias para la revisión de proyectos que mejoren la calidad ambiental en sus producciones a la vez que determinen un camino trazado para el bienestar económico de la empresa, en este sentido el gobierno colombiano ha venido realizando estudios y acercamientos para implementación de energías renovables.

Dentro de este contexto el presente trabajo constituye un avance para la industria del sector porcícola del valle del cauca, al comparar modelos para generación de energía a partir de residuos orgánicos propios de su producción, identificar los elementos técnicos y legales para la implementación de dichos proyectos y por ultimo evaluar financieramente la implementación de dichos modelos. Aportando de esta manera a la sostenibilidad de la empresa objeto de estudio y generando valor a la misma.

4. METODOLOGÍA.

4.1. Metodología De Análisis.

El estudio de prefactibilidad de un proyecto consiste en el análisis técnico – económico de una solución o soluciones planteadas a un problema o una oportunidad, en donde se busca generar conclusiones del tipo:

- a. Postergar el proyecto
- b. Reformular el Proyecto
- c. Abandonar el Proyecto
- d. Continuar su estudio a nivel factibilidad

Debido a que un estudio de prefactibilidad cuenta con diferentes componentes como lo son los técnicos, legales, económicos y ambientales; para el caso de este trabajo se implementaron diferentes metodologías que permitieron contestar las siguientes preguntas que se presentan en el gráfico:

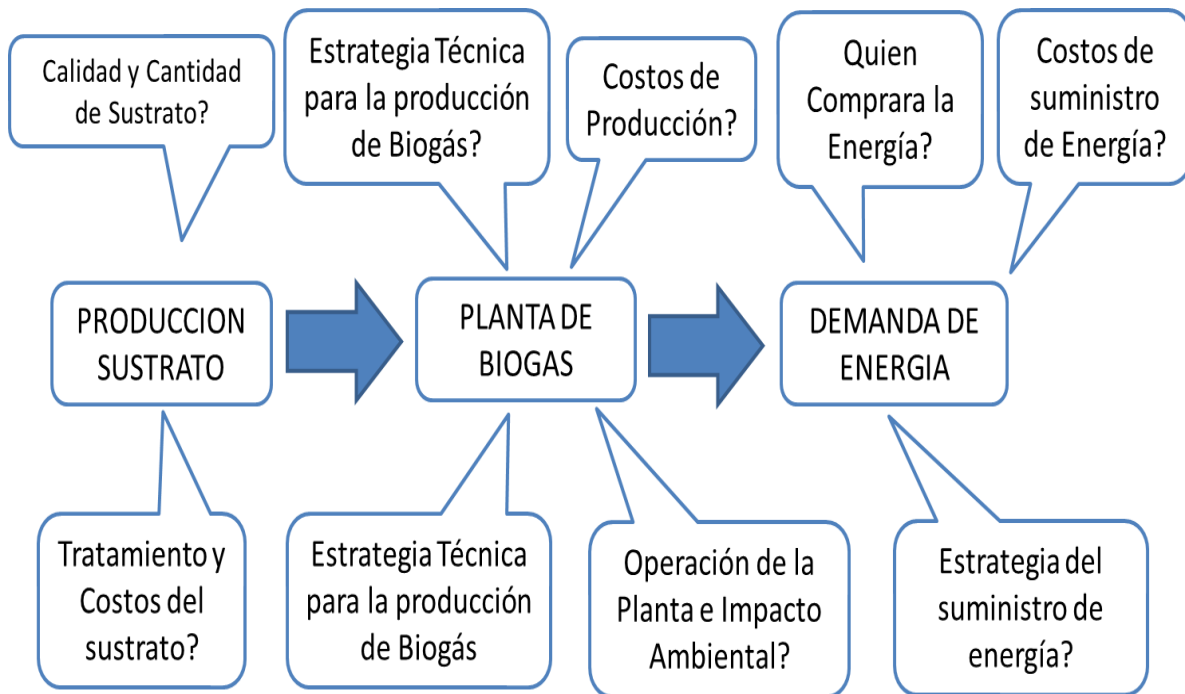


Figura 8 Datos y análisis del proyecto.
Fuente: (E.V., 2010) elaboración propia

4.1.1. Evaluar y Comparar modelos para producción de energía a través de la transformación de la Biomasa en las granjas.

Inicialmente se realizó la caracterización general del proceso de generación de energía eléctrica de tres diferentes tipos de plantas generadoras **PEQUEÑA ESCALA o AUTOGENERACIÓN, MEDIANA ESCALA Y GRAN ESCALA**, las cuales se diferencian particularmente en la escala de producción y capacidad de tratamiento de residuos orgánicos, para la caracterización se usó la herramienta **SIPOC**, que es un acrónimo de las palabras **Supplier, Input, Process, Output. Customer**, para lo cual se realizó una consulta exhaustiva en base de datos, centros de investigación, e informes de la unión europea ya que los países europeos poseen un know – how consolidado en el diseño de estos tres modelos de producción.

Una vez caracterizados los modelos para producción de energía eléctrica mencionados anteriormente, se definieron 5 granjas que pertenecen al grupo empresarial objeto de estudio, para realizar el levantamiento de la información, las granjas seleccionadas para tal fin se escogieron usando los siguientes tres parámetros:

- **Ciclos de producción:** se identificaron granjas con los distintos ciclos de producción que tiene la empresa (ciclo completo, de medio ciclo, y ciclo final), de las cuales se seleccionaron por lo menos una granja de cada ciclo.
- **Producción de Biogás:** se identificaron granjas con sistemas de tratamiento de los residuos que contaran con producción de Biogás y los cuales no fueran superior a 5 años de instalados.
- **Tamaño de la granja:** se realizó un Pareto de las granjas identificando aquellas que tienen el mayor número de cabezas de ganado porcino y que cumplieran los dos parámetros anteriores.

Una vez establecida las granjas, se procedió a realizar la visita de cada una de ellas, en donde se caracterizó el proceso y se recolectaron los siguientes datos:

- **Sustrato:** Población de la granja, Caracterización del purín, Volúmenes de efluentes, Proyección de crecimiento en cabezas.
- **Superficie:** Tipo de suelo, Área, Distribución de la Granja.
- **Granja:** Consumo eléctrico actual y proyectado, condiciones meteorológicas; y caracterización del sistema de tratamiento de los efluentes.

Para lo cual:

1. Se revisaron condiciones de instalación para el tratamiento del manure (residuo de la producción porcícola)

2. Se realizaron entrevistas con los administradores o supervisores de las granjas.
3. Se revisó documentación y se tomaron datos particulares sobre el sistema de tratamiento del manure.

Una vez obtenidos los datos anteriores se procedió a realizar los cálculos de las siguientes estimaciones teóricas:

1. producción de materia prima (excretas).

$$E = NA \times PVP \times PE$$

Ecuación 1. Calculo producción de estiércol solido

$$O = N_a \times PVP \times \left(\frac{PO}{100} \right)$$

Ecuación 2. Calculo producción de orín

$$MPC = E + O$$

Ecuación 3. Calculo cantidad Materia prima de carga

2. producción de Biogás.

$$P_G = MPC \times S_v \times P$$

Ecuación 4. Calculo producción estimada de Biogás

Para realizar los cálculos, se utilizó las metodologías reportadas en las guías y manuales de producción de la República de Chile (INIA) y Colombia (UPME)). El análisis de estas estimaciones teóricas se contrastó con los datos y cálculos realizados para la producción actual.

4.1.2. Determinar el potencial de generación de energía para cada una de las granjas.

Una vez se determinó el potencial de producción de biogás de las granjas se realizaron los cálculos de producción de energía usando la siguiente ecuación

$$E_E = P_G * 0.58 \frac{kwh}{m^3}$$

Ecuación 5. Calculo producción estimada de Energía Eléctrica

Donde (**P_G**), es la producción de gas usado para la generación eléctrica, y el factor 0,58, es el factor de consumo de m³ de biogás para generación de un kw/h. el cual se encuentra reportado en la ficha técnica de generadores de Biogás del mercado (Anexo

3), para esto se escogió generadores de la marca “Aqualimpia”, el cual fue el único al que se obtuvo acceso dentro del mercado colombiano y que cuenta con proyectos en Panamá, Costa Rica y Ecuador.

En cuanto al potencial de energía para un planta centralizada, se estimó que por el tamaño de las granjas, la planta se asemejaría a una de mediana escala, para obtener el punto geográfico donde debe estar localizada la planta se usó el método de centro de gravedad (CDG), el cual permite estimar la ubicación teniendo en cuenta el aporte de las granjas, a partir de la definición de unas coordenadas en un plano cartesiano, para luego ubicar los puntos en “x” y “y”; a continuación se presentan las ecuaciones de dichos puntos

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ix} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Ecuación 6. Coordenadas en “x”

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iy} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Ecuación 7. Coordenadas en “y”

Donde **(C_x)** es las Coordenadas de la nueva instalación en “x”, **(C_y)** las Coordenadas de la nueva instalación en “y”, **(d_{ix})** la distancia de la ubicación i en términos de la coordenada en “x”, **(d_{iy})** la distancia de la ubicación i en términos de la coordenada en “y”, y **(V_i)** el Aporte en la ubicación i.

Una vez se halló la ubicación geográfica se procedió a realizar los cálculos de estimación de la producción de biogás, usando la metodología reportada anteriormente “ecuaciones 1 a 4” luego se calculó la generación eléctrica para dicha planta, para lo cual se utilizó la ecuación 5.

4.1.3. Determinar los mecanismos técnicos y legales de la entrega de energía al gestor de la red eléctrica y evaluar la viabilidad financiera de la producción de energía de la biomasa.

Una vez obtenidos los datos, de las estimaciones en la producción de energía para los modelos, se procedió a realizar la revisión de las normas, así como, entrevistas y visitas a las entidades reguladoras, con el fin de recolectar los datos de aplicabilidad de las normas tal como se encuentra en el marco teórico (3.2.4. Marco legal colombiano), una vez revisado lo concerniente a la normatividad con las autoridades se realizó el análisis para la entrega de la producción eléctrica según cada modelo estudiado y la aplicabilidad, identificando los obstáculos para la implementación de los proyectos

Por último, se evaluó la viabilidad financiera de la producción de energía de la biomasa, tanto para los proyectos de autogeneración “pequeña escala” como para el proyecto de mediana escala, se realizaron las estimaciones de los costos de inversión, operativos y de transporte de los proyectos generados, con el fin de realizar el Análisis Costo Beneficio **(ACB)** a través de los siguientes 5 criterios; Valor de Presente Neto **(VPN)**, Tasa Interna de Retorno **(TIR)**, Tasa Interna de Retorno Modificada **(TIRM)**, Índice de Rentabilidad **(IR)** y Periodo de Recuperación **(PR)**. Para el proyecto de inversión de la planta de mediana escala se realizó un modelo de optimización binario, el cual permitió calcular el máximo VPN para el proyecto, teniendo en cuenta el aporte de materia prima por granja, impactando la inversión, costos y generación de ingresos por producción de energía.

5. RESULTADOS

5.1. Evaluación y Comparación de Modelos Para Producción de Energía a Través de la Transformación de la Biomasa en las Granjas.

Para el presente trabajo se establecieron tres modelos de producción de energía a partir de la Biomasa resultante del proceso productivo en las granjas de cerdo de una empresa del sector porcícola; los modelos escogidos en cuanto al proceso de producción, conservan características similares; sin embargo, se diferencian por el tamaño de la planta y/o capacidad de tratamiento de residuos (Ton Año), así como en la forma de obtención o procedencia de la materia prima para el proceso productivo energético. Entre los tres modelos de estudio existen dos que comparten un sistema centralizado de localización de la planta de tratamiento, y un tercero que es autónomo para cada granja y su nivel de producción es de pequeña escala.

Para la caracterización de cada uno de los tres modelos, se escogieron plantas existentes que compartían las características de escala de producción, en el anexo 1 se encuentra el listado de dichas plantas; la caracterización como se mencionó en la metodología se realizó usando un SIPOC, donde se realizaron las siguientes consideraciones para los tres modelos:

Suppliers: Los Proveedores son las granjas del grupo empresarial, siendo para la pequeña escala la granja donde se ubica la planta, mientras que en los modelos de mediana y gran escala sería la propia granja de la ubicación de la planta y las granjas circundantes.

Customers: En los tres casos, el cliente es el gestor de la red.

Por lo anterior tanto el proveedor como los clientes, se omitieron dentro de los esquemas realizados. A continuación, se presentan las características técnicas principales de los tres modelos (Fischer, Krieg, & Chae, 2002):

- **Planta de Pequeña Escala (Autogeneración):** Podemos encontrar este modelo de producción en casi todo el mundo, puesto que es la forma más común para tratar los residuos de la producción o explotación de ganado vacuno o porcino y obtener algún tipo de beneficio de su producción.

Este tipo de plantas están diseñadas para tratar entre 1.000 y 20.000 toneladas anuales de residuos, por lo que su producción de energía eléctrica no supera en la mayoría de las ocasiones el consumo propio de la granja; debido a la baja producción de gas y las pérdidas energéticas en su transformación a energía eléctrica. Este modelo se enfoca en la utilización del gas para calefacción o uso en cocinas y en la producción del biofertilizante; una característica de este modelo es que la fracción sólida en muchas ocasiones es retirada de la materia prima de carga del biodigestor para ser usada de

manera directa como corrector edáfico. En este modelo, los biodigestores pueden ser de tipo continuo o semicontinuos, siendo para las granjas más pequeñas el digestor taiwanés o tipo salchicha el más usado ya que sus costos de fabricación son bastantes bajos.(Ica, Camino, & Una, 2010)

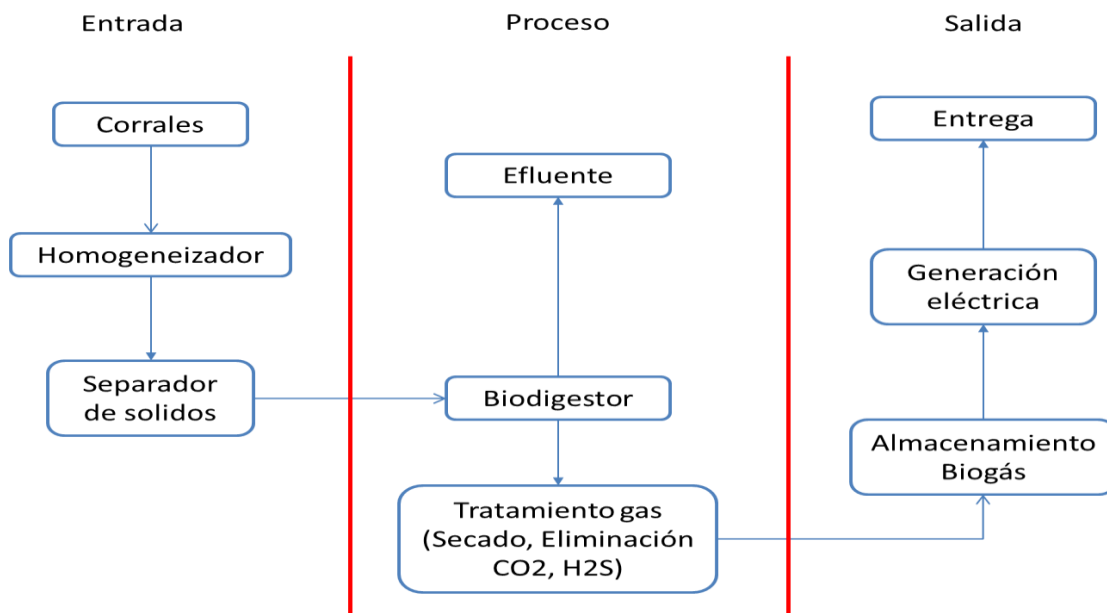


Figura 9 Esquema de producción Planta de pequeña escala
Fuente: elaboración propia

- Planta Centralizada de Mediana Escala:** La característica principal de este tipo de plantas al igual que en la planta centralizada de gran escala, es que su materia prima es recolectada de las granjas circundantes; este modelo de planta es la más difundida en Europa ya que sus costos de inversión son menores y tienen subvenciones en la mayoría de países de la Unión Europea(Frandsen et al., 2011)

Este modelo se caracteriza por manejar entre 20.000 y 100.000 toneladas anuales de residuos, obteniendo producciones entre 100 y 700kw continuos de potencia eléctrica. A diferencia de las centrales de gran tamaño no hay separación de la materia prima líquida y por lo general sus digestores son de ciclo húmedo, los lodos son mezclados directamente en el tanque homogeneizador junto con algo de material seco que puede ser ensilaje, o desechos vegetales para producir una pasta que es higienizada a 70°C, y luego introducida al digestor el cual puede variar entre 1000 y 3000m³ para el proceso de obtención del gas, una vez obtenido el gas este es secado, desulfurizado y comprimido para su utilización en el proceso productivo, el cual en todos los casos revisados fue de cogeneración electricidad y calor.

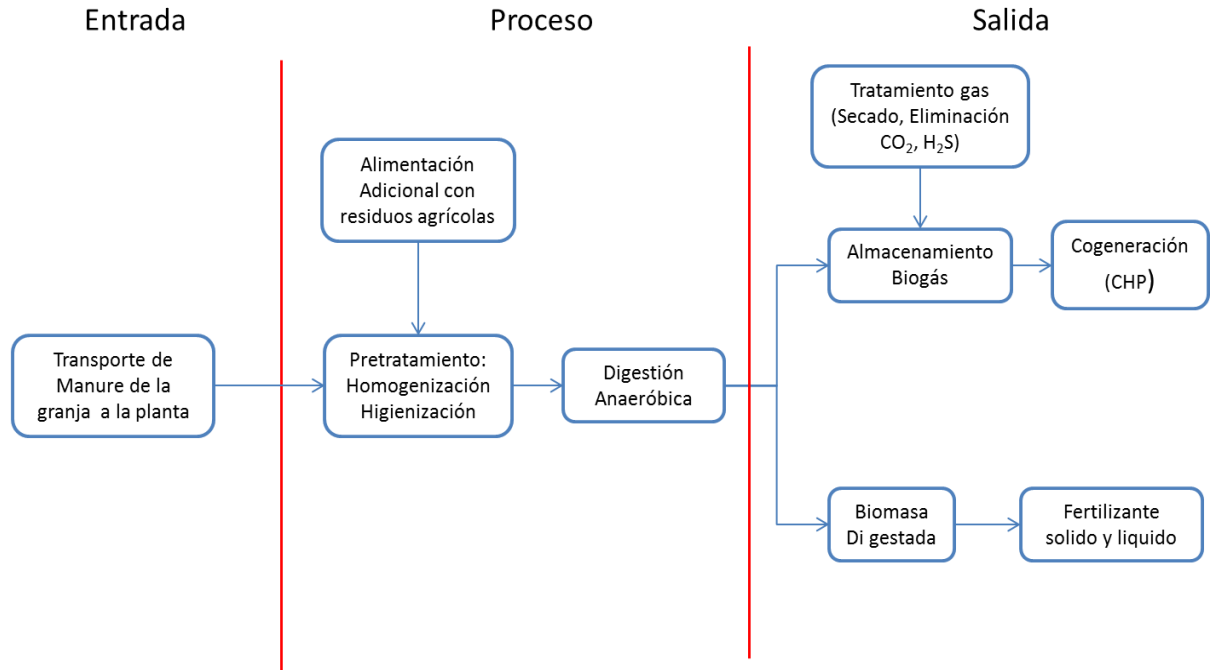


Figura 10 Esquema de producción centralizada de Mediana tamaño
Fuente: elaboración propia

- **Planta Centralizada de Gran Tamaño:**

Al igual que las plantas centralizadas de mediana escala, su proceso presenta las mismas características puesto que permite obtener energía eléctrica a partir del tratamiento de los purines y material biodegradable recolectados en las granjas circundantes. En 4 de los 5 casos (anexo 1) revisados se encontró que las granjas manejaban diferentes co-sustratos para su producción.

Otra característica de estas plantas es que el sustrato para carga en el digestor debe estar seco, ya que se utilizan tecnologías para disminuir el volumen de la fracción líquida y usan la mayor cantidad de fracción sólida. La tecnología usada en cada planta va depender de qué forma lleguen los sustratos, en especial el manure de cerdo.

Existen dos mecanismos diferenciados para la forma de entrega de los sustratos en lo referente al manure de cerdo (Frandsen et al., 2011):

1. Separación de la fracción sólida en las granjas y posterior entrega a la planta, lo cual se traduce en facilidad de transporte del material a digerir (fracción sólida).
2. Transporte en carro tanques del manure en su estado normal (lodo), separación en planta por diferentes procesos, siendo el más común por los volúmenes manejados en el proceso de centrifugado.

Una vez se recibe el material es homogenizado y pasa a higienización normalmente por calor a 70°C, con la finalidad de eliminar patógenos o sustancias que inhiban la capacidad metabólica de las bacterias anaeróbicas responsables de la digestión(Frandsen et al., 2011).

En este modelo de planta se cuenta con un volumen de digestión superior a los 3.000 m³, que puede estar compuesto por uno o más digestores; la capacidad de tratamiento de desechos es mayor a las 100.000 toneladas-año sólo para fracciones sólidas, y su producción energética es de cogeneración con una potencia eléctrica mayor a 700kw por hora continuos.

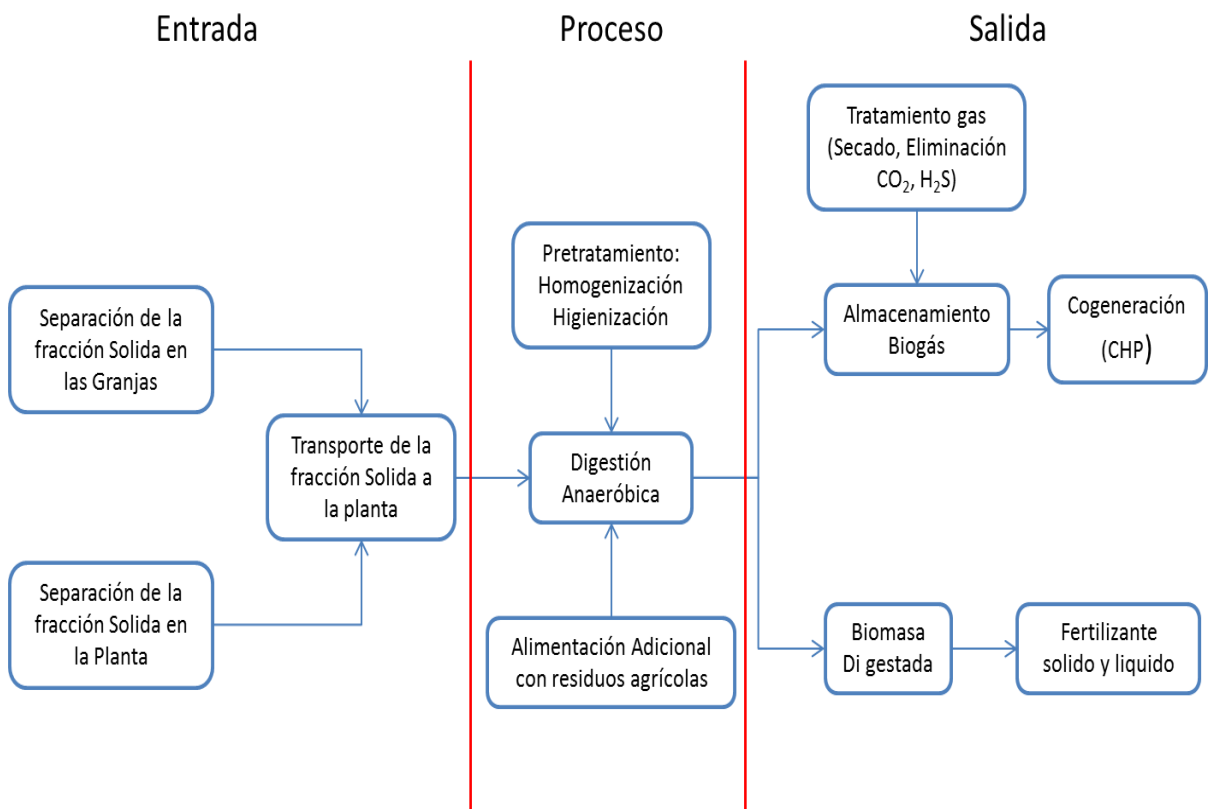


Figura 11 Esquema de producción centralizada de Gran tamaño
Fuente: elaboración propia

Una vez caracterizados los tres modelos se presentan los factores claves recogidos en las referencias revisadas, véase Tabla 8, así como las ventajas y desventajas para cada modelo las cuales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 8 Factores Claves de los tres modelos de plantas de biogas

Factores claves	Planta centralizada de gran tamaño	Planta centralizada de Tamaño Mediano	Planta de pequeña escala (autoconsumo)
Tipo de Substrato	Materia seca principalmente manure de cerdo con posibilidad de uso de otros materiales	Materia seca principalmente manure de cerdo con posibilidad de uso de otros materiales	Estiércol Liquido de cerdo
Cantidad de cerdos (aprox.)	> 98.500	> 19.800	> 2.650
Toneladas de Sustrato por día (aprox.)	500 - 1000	80 -400	1 - 50
Consecución Materia Prima	Granjas circundantes	Granjas circundantes	Producción propia
Volumen del digestor	>3000 m3	> 1000m3 y <3000m3	>100m3 y <1000m3
Propósito principal	Producción de energía eléctrica	Producción de Biogás y/o energía eléctrica	Reducción del impacto ambiental

Tabla 9 Ventajas y Desventajas de los tres modelos(Frandsen et al., 2011)

Modelo	Ventajas	Desventajas
Planta de pequeña escala (autoconsumo)	<ul style="list-style-type: none"> • Baja Inversión • Fácil operación y mantenimiento de la planta. • Bajos costos de transporte de la materia prima • No es necesario la sanitización de la materia prima 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción deficiente. • Proceso secundario. • Poca producción de energía, la cual cubre la demanda interna.

<p>Planta centralizada de Tamaño Mediano</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia en producción. • Organización y operación en una sola actividad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesita un Área grande para instalación. • Pre-separación de biomasa • Logística y costos de transporte
<p>Planta centralizada de gran tamaño</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Economía de escala • Eficiencia en producción. • Organización y Operación en una sola actividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta Inversión. • Se necesita un Área grande para instalación. • Pre-separación de biomasa • Logística y costos de Transporte

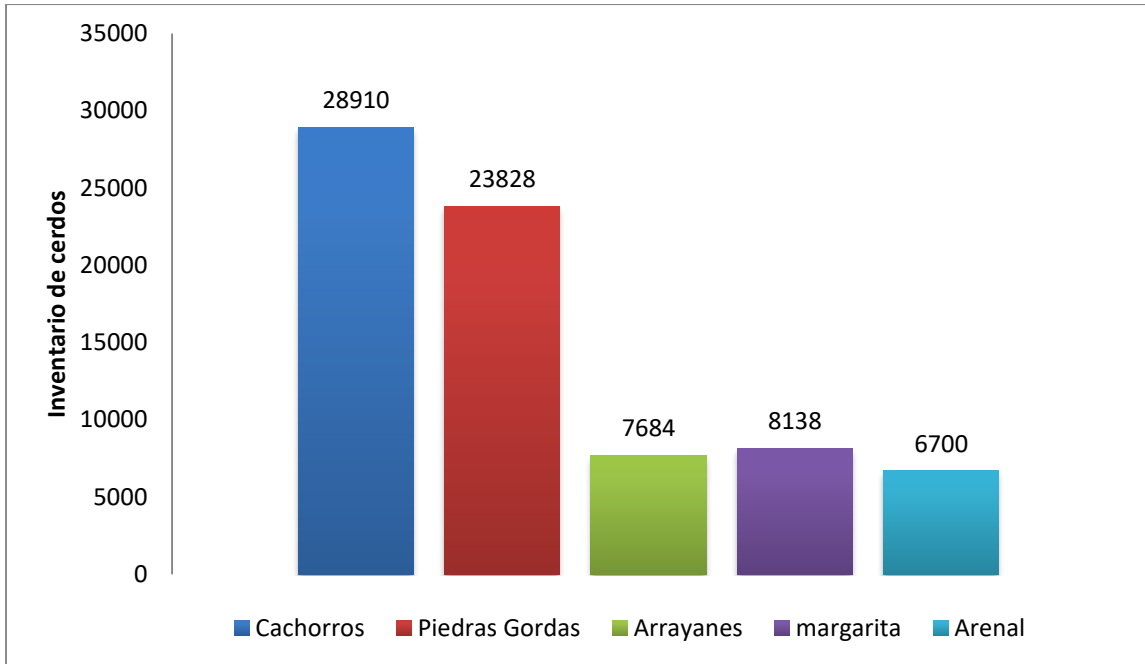
5.1.1. Caracterización de la producción de biogás en las granjas de una empresa del sector porcícola.

Para la caracterización de producción de Biogás en las granjas de una empresa del sector porcícola se escogieron 5 granjas (cachorros, la margarita, el arenal, piedras gordas, y arrayanes) Los factores que se utilizaron para escoger dichas granjas fueron:

1. **Ciclos de Producción:** La empresa cuenta con los siguiente tres tipos de ciclo de producción:
 - a. Granjas ciclo completo: Comprenden establos para Cría, Precebo y Cebo
 - b. Granjas de medio ciclo: Las cuales comprenden establos solo para Precebo y Cebo,
 - c. Granjas de ciclo final: comprende solo establos de ceba o engorde.

Por lo cual, se escogió para el estudio al menos una granja de cada ciclo.

2. **Producción de biogás:** Se seleccionaron aquellas granjas que cuentan con procesos autónomos de tratamiento de residuos (manure de cerdo) para la producción de Biogás.
3. **Tamaño de las granjas:** Se escogieron las granjas con más inventario activo de cerdos, para lo cual, la empresa en cuestión realizó un Pareto en las granjas obteniéndose las 5 granjas que se muestra en la grafica 3.



*Grafico 3 Inventario de cerdos en las granjas seleccionadas para el estudio
Fuente: Datos Industria; Elaboración propia*

A continuación, se muestra la ubicación geográfica de las granjas seleccionadas para la caracterización de la producción de biogás en dichas granjas.

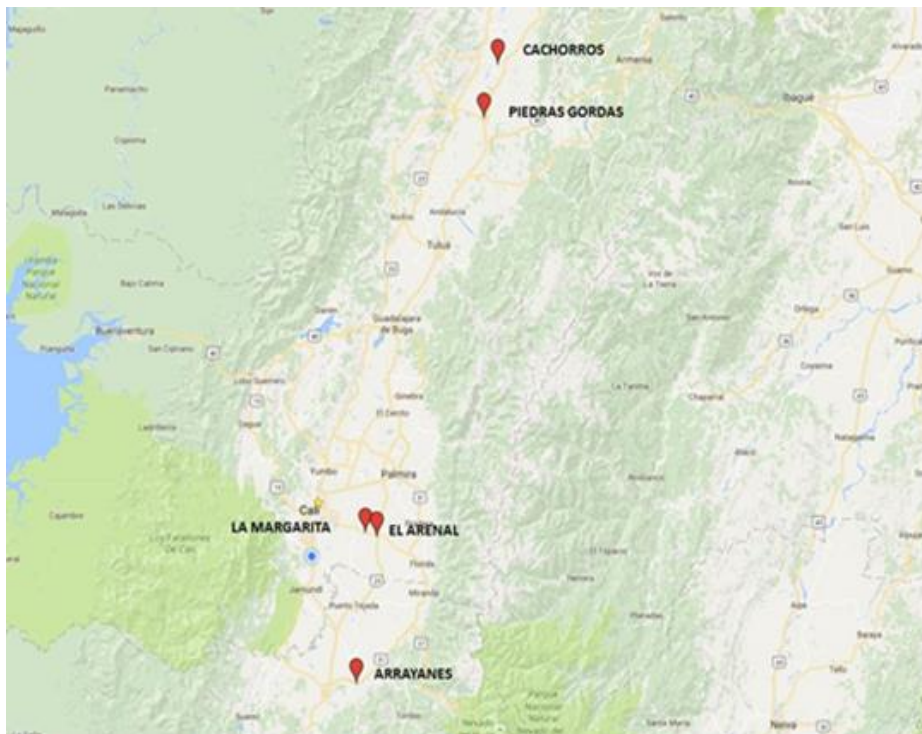


Figura 12 Mapa ubicación de las Granjas Visitadas
Fuente: elaboracion propia

Del proceso de producción de biogás en las granjas visitadas, se observó que las características principales del proceso son similares (figura. 13) y que las variaciones en la producción entre granja y granja se encuentran en los siguientes puntos:

1. **Transporte del flujo de purín:** Se encontraron dos formas, por gravedad o por uso de motobomba.
2. **Tipos de biodigestor:** La mayoría de las granjas cuentan con Biodigestores tipo Taiwán, sólo una de las granjas cuenta con un digestor de tipo laguna de oxidación.

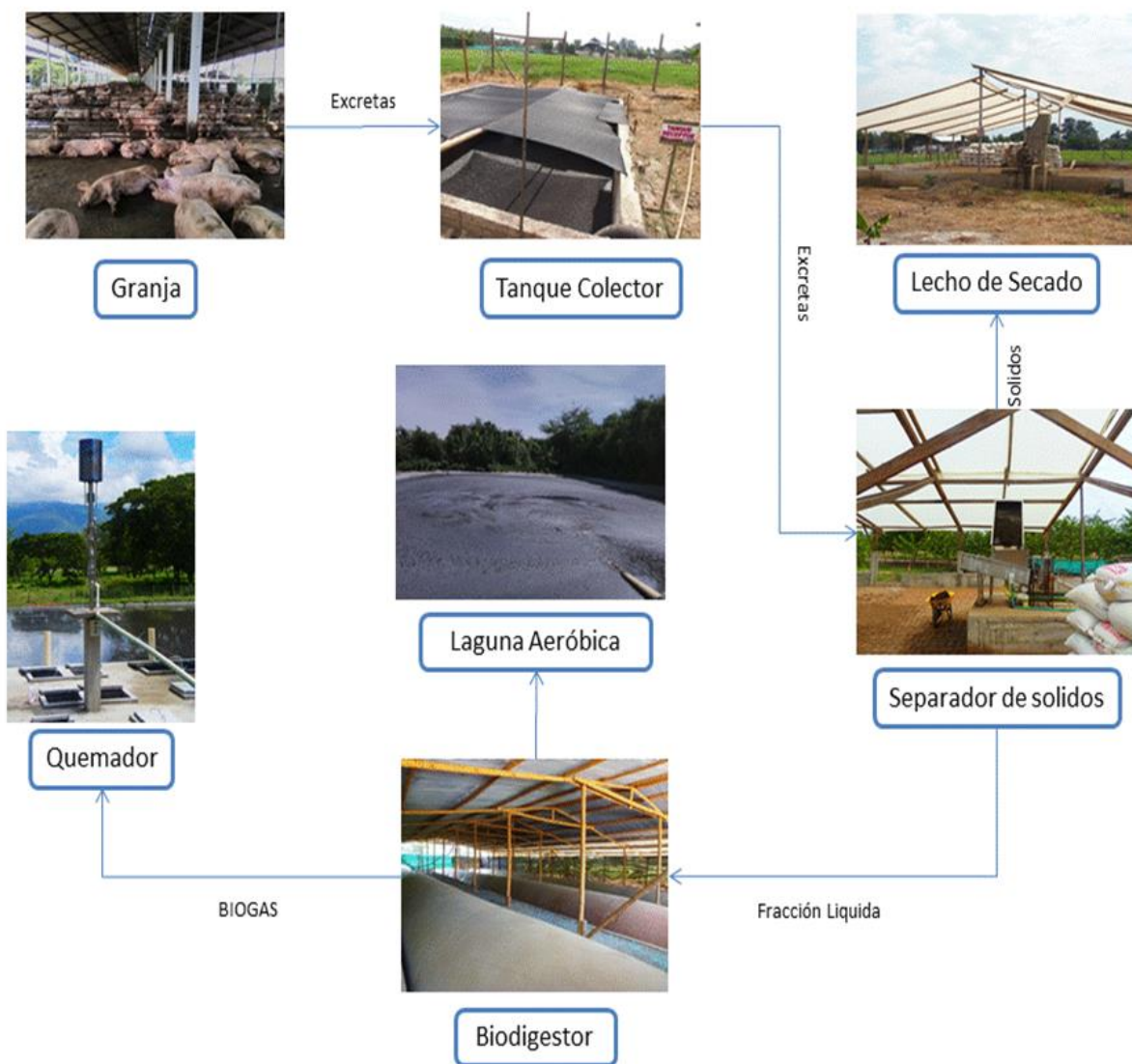


Figura 43 Proceso actual de las granjas
Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan los datos recogidos dentro de las visitas, los datos resaltados en negrilla son los más relevantes para el caso de estudio.

Tabla 10 Datos Generales recolectados en las Granjas

Datos		Cachorros	Piedras Gordas	Arrayanes	Margarita	Arenal
Inventario de cerdos	Total	28.910	23.828	7.684	8.138	6.700
Datos Técnicos	Empresa Energía	EPSA	EPSA	CEDELCA	EPSA	EPSA
	Consumo De Energía Aprox. (Kw.h .Mes)	24.830	22.612	4.960	9.468	7.620
	Consumo De Energía Aprox. (Kw.h .dia)	964	754	165	316	254
Proceso Del Manure	Tanque Colector	SI	SI	SI	SI	SI
	Tanque Homogeneizadores	NO	NO	NO	NO	NO
	Separador De Solidos	SI	SI	SI	SI	SI
	Laguna Anaeróbica	SI	SI	SI	SI	SI
Biodigestor	Tipo	Taiwán	Laguna de Oxidación	Taiwán	Taiwán	Taiwán
	Alimentación	Liquido sobrante	Liquido sobrante	Liquido sobrante	Liquido sobrante	Liquid o sobrante
	Cantidad de biodigestores	7	1	3	6	6
	Volumen total m³	952	6.000	408	816	816
Tratamiento De Gas	Secado Del Gas	NO	NO	NO	NO	NO
	Eliminación CO ₂	NO	NO	NO	NO	NO
	Eliminación H ₂ S	NO	NO	NO	NO	NO
	Almacenamiento	NO	NO	NO	NO	NO
	Quemador	SI	SI	SI	SI	SI

Una vez se realizó el levantamiento en sitio de la información perteneciente a las granjas, se procedió a realizar los cálculos reportados en la Tabla 11. Para esto se aplicaron los modelos y ecuaciones teóricas de la guía colombiana “UPME” (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015), así como la ficha técnica de los

biodigestores de cada granja Anexo 3. Igualmente para los cálculos realizados se tuvieron en cuenta los siguientes supuestos:

1. **Biodigestor de ciclo continuo y de carga completa.**
2. **Inventario de cerdos fijo en cada granja.**

Tabla 11 Resumen cálculos de producción de materia prima y biogas en las granjas

Datos		Cachorros	Piedras gordas	Arrayanes	Margarita	Arenal
Producción de Excretas	Producción estimada de Excretas Ton/día (LINIA)	117	98	34	25	14
	Producción estimada de Excretas Ton/día (UPME)	156	128	42	44	36
Producción Biogás	Producción teórica según guía UPME (m ³ /día)	3886	3202	1033	1094	900
	Producción estimada actual (m ³ /día)	29	4000	12	24	24
	Producción teórica según guía UPME (m³/hora)	162	133	43	46	38
	Producción estimada actual (m ³ /hora)	1.21	166	0.5	1.0	1.0

En el caso de la producción de excretas entre las dos metodologías usadas para el cálculo Anexo 2, se observa una variación entre la guía chilena (LINIA) y la colombiana (UPME), en donde esta última presenta un 30% aproximadamente de mayor producción, esto se debe a que en la guía de UPME, el factor para el aporte en el flujo de las excretas es uno solo y tiene en cuenta el Peso Vivo Promedio(PVP) de cada animal, mientras que la guía de LINIA estima el flujo por el PVP y un factor según el estadio de

cada animal. Por tanto, la guía LINIA tiene una consideración de mayor especificidad para el cálculo de producción de excretas.

Como se observa, para el caso de la producción de biogás teórica en cada granja (UPME) el potencial de producción sobrepasa a los datos de producción actual, en 4 de las 5 granjas observadas, esta gran diferencia se debe principalmente a que, en el proceso actual, el material sólido (purín), es retirado del efluente de carga al digestor para uso como corrector edáfico directo, disminuyendo la cantidad de sólidos en el digestor, adicionalmente, los digestores son más pequeños que los requeridos y su tiempo de retención hidráulico estimado es de 10 días, lo que puede ocasionar que el digestato no sea degradado en su totalidad disminuyendo la eficiencia en la producción del Biogas.

Se evidencia una diferencia de 800 m³ de producción de biogás para la granja de piedras gordas entre las estimaciones teóricas 3200 m³ y las reales 4000m³, lo cual representa un porcentaje de error en las estimaciones teóricas del 20%, esto puede ser atribuible a que el PVP de los animales, usado en el cálculo de excretas es estándar de 100Kg, mientras que el peso de los animales puede llegar hasta los 200kg.

Por último, si se tiene en cuenta los parámetros de cantidad de cerdos y producción de excretas por día definidos en la Tabla 8, para los modelos especificados anteriormente, las granjas Arrayanes, Margaritas y Arenal, se pueden situar en el modelo de Autogeneración de pequeña escala, mientras que las granjas de cachorros y piedras gordas pueden ser consideradas para la producción centralizada de mediana escala; la sumatoria en los dos factores para las 5 granjas, solo alcanza para un modelo aplicable de una planta centralizada de mediana escala, por lo que en adelante nos centraremos solo en los modelos de pequeña y mediana escala.

5.2. Determinar el potencial de generación de energía para cada una de las granjas.

Con los datos de producción estimada de biogás (teóricos y actuales) reportados en la Tabla 11, y usando como referencia un generador con un motor de ignición marca “Aqua Limpia” de 50 – 132 (la ficha técnica de dicho generador se presenta en el Anexo 3), y la ecuación 1 reportada en la metodología se calculó para cada granja, la producción de energía eléctrica, los datos de potencial de producción de energía se recogen en la Tabla 12 y Tabla 13.

Tabla 12 Estimación de la producción de energía eléctrica en las Granjas con la producción actual de Biogas

Datos	Cachorros	Piedras gordas	Arrayanes	Margarita	Arenal
Producción de Energía en una hora (Kw)	0.70	96	0.29	0.58	0.58
Capacidad de la planta (MW) x día	0.016	2.3	0.007	0.013	0.013

Con los sistemas de producción actual de Biogás, solo la granja piedras gordas tiene interés para la producción de energía ya que en las demás granjas, los niveles de producción de energía eléctrica serían muy bajos para considerar alguna inversión.

Tabla 13 Estimación de la producción de energía en las Granjas con producción teórica del Biogas (UPME).

	Cachorros	Piedras gordas	Arrayanes	Margarita	Arenal
Producción de Energía en una hora (Kw)	94	77	25	26	22
Capacidad de la planta (MW) x día	2.25	1.86	0.60	0.63	0.52

Al contrastar los datos de consumo eléctrico por granja reportados en la Tabla 10, con la producción de energía eléctrica de los sistemas teóricos, se observa que si las granjas contaran con los sistemas adecuados de producción, dichas granjas producirían aproximadamente entre 2 y 2,5 veces su consumo, tal como se evidencia en el Grafico 4, por lo que dichos proyectos serían auto sostenible y generarían un excedente que puede ser entregado a la red.

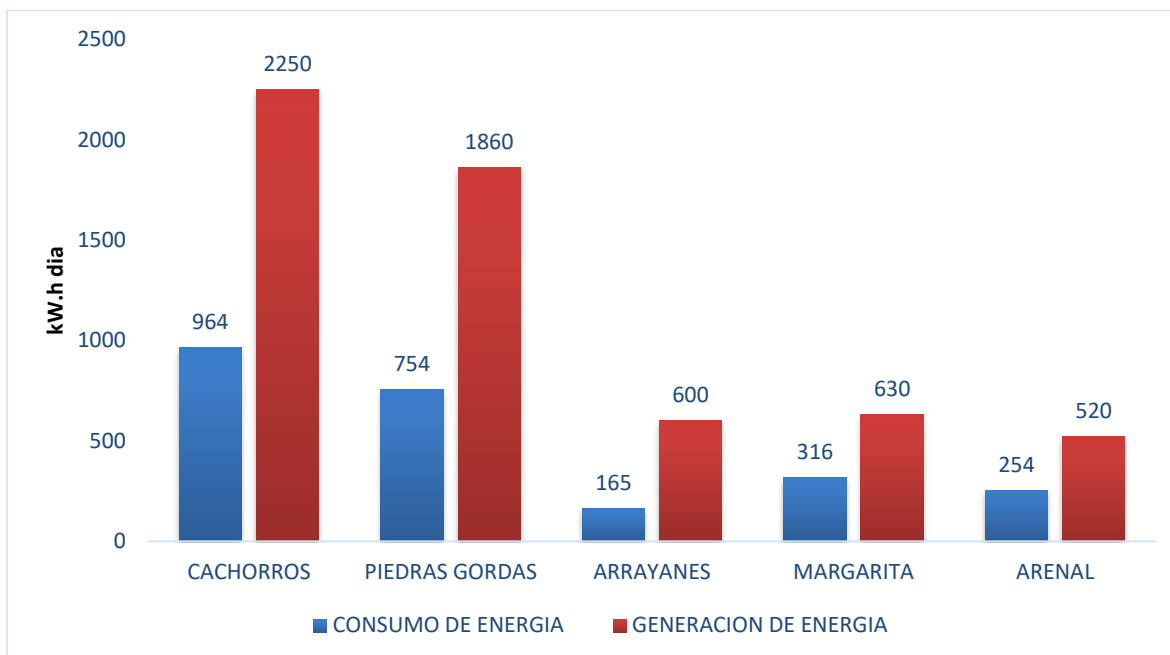


Grafico 4 Comparación de consumo de energía y producción de energía teórica por granja.
Fuente: elaboración propia

5.2.1. Estimación de la Generación Eléctrica de la Planta de Mediana Escala, Centralizada.

Como ya lo mencionamos anteriormente toda la producción de las granjas seleccionadas alcanzan para una planta centralizada de mediana escala tomando los datos de la Tabla 8 sobre la producción diaria de excretas por toneladas, se realizó el cálculo de una planta que recibe aproximadamente 400 toneladas diarias de sustrato (excretas de cerdo) y un tiempo de retención hidráulica de 32 días, para esto se utilizó las ecuaciones descritas en el anexo 1 y la ficha técnica de un generador “Aqua Limpia” de 198 – 625 kw (anexo 3) obteniéndose los datos reportados en la Tabla 14.

Tabla 14 Estimación de la producción de energía en una planta centralizada de mediana escala

Toneladas de Sustrato por día	Volumen del digestor necesario (m ³)	Días de retención Hidráulica	Producción de Biogás (m ³ .día)	Producción de energía kw.h	Capacidad de la planta (MW)
406	15.843	32	10.115	244	5.87

Al contrastar la producción de la planta centralizada por día con la sumatoria del consumo promedio por día de todas las granjas se observa que la producción de energía

rebase al consumo en un 42%, con lo cual se daría cumplimiento a la demanda interna y se generaría un excedente para la venta, o para cubrir la demanda de otras granjas perteneciente al grupo.

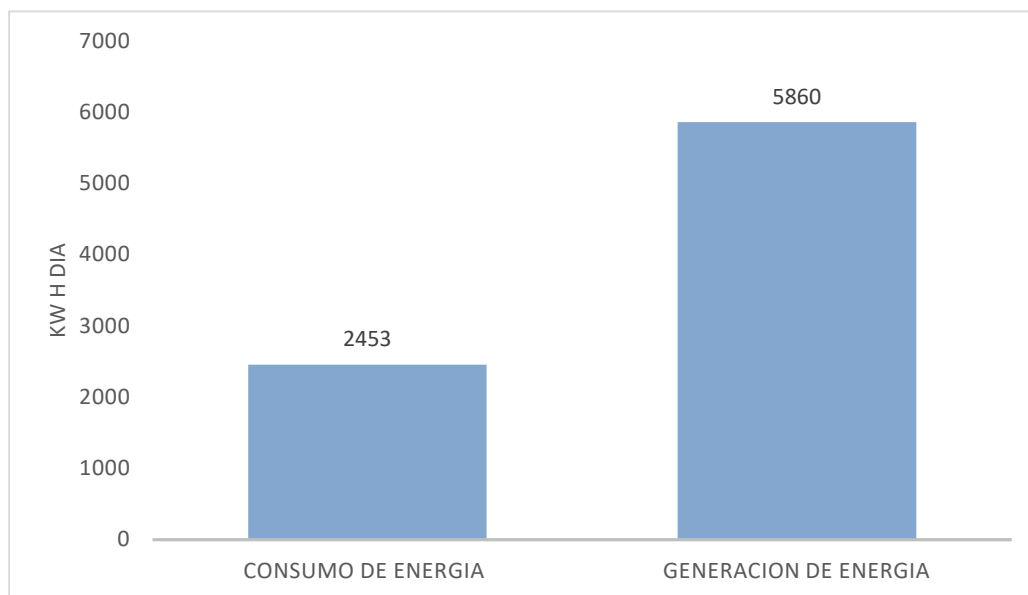


Grafico 5 Comparación de consumo de energía por día de todas las granjas y producción de energía teórica de la granja centralizada.

Fuente: elaboración propia

5.2.1.1. Ubicación planta centralizada para la producción de energía eléctrica.

Una vez se calculó el potencial de generación de energía eléctrica para la planta centralizada de mediana escala, se realizó la estimación de la ubicación de dicha planta para lo cual se usó el modelo de centro de gravedad (CDG), el cual se encuentra detallado en el anexo 4, donde se obtuvo una ubicación preliminar de la planta entre la ciudad de Tuluá y Andalucía, tal como se muestra en la figura 13; sin embargo al analizar el modelo del CDG la planta estaría relativamente cerca de la Granja de piedras Gordas (aproximadamente 40 Km), con lo que se considera, como una mejor práctica el desplazamiento de la planta a dicha granja, ya que esta cuenta con las siguientes ventajas:

1. Posee terreno disponible
2. De las granjas visitadas posee el sistema más nuevo para producción de Biogás
3. El sistema de digestión (laguna oxidativa) cuenta con una capacidad de 6000 m³ y es el mayor volumen de las granjas reportadas.

4. Menor inversión ya que sería solo adecuación de la planta actual.

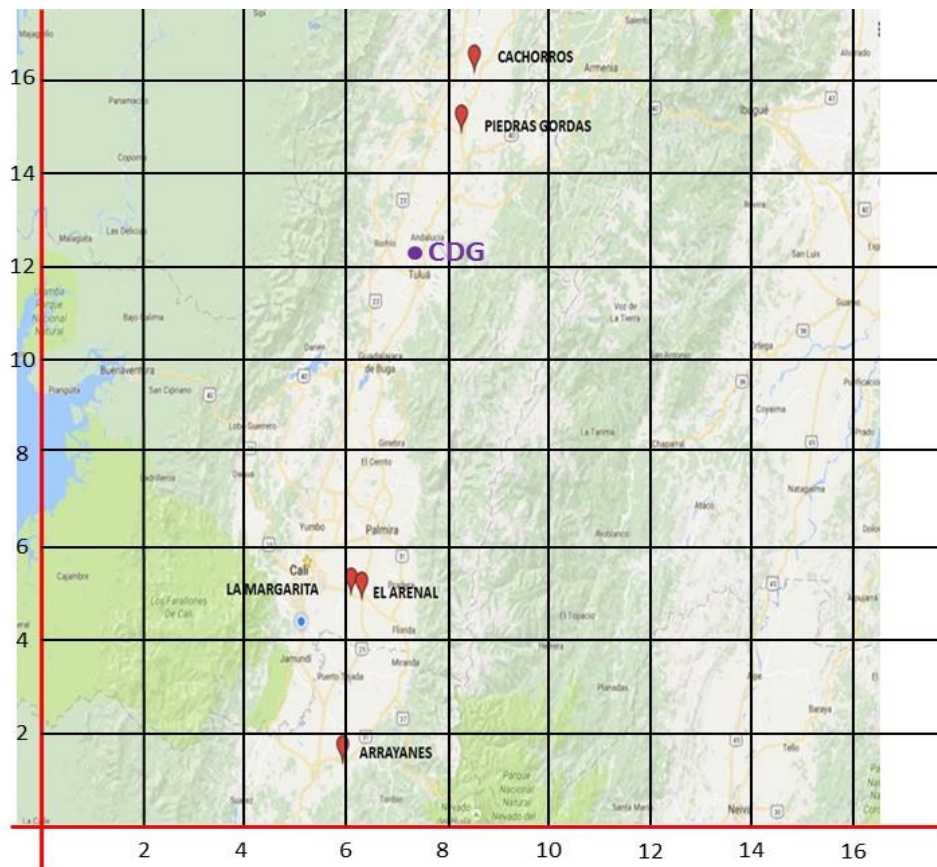


Figura 54 Ubicación Geográfica de la planta centralizada en el modelo CDG
Fuente: elaboración propia

5.3. Determinar los mecanismos técnicos y legales de la entrega de energía al gestor de la red eléctrica y evaluar la viabilidad financiera de la producción de energía de la biomasa.

5.3.1. Marco Legal del proyecto

A continuación se recogen los artículos, párrafos, anexos y capítulos más importantes de la normatividad colombiana que impactan los proyectos de producción de energía para los sistemas de autogeneración de pequeña y mediana escala.

Tabla 15 Resumen del marco legal

Ley, Decreto o Resolución	Objetivo	Aplicación	Artículos
Ley 1715 de 2014	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.	Información	Artículo 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 24, 44
Decreto 2532 de 2001	Por el cual se reglamenta el numeral 4 del artículo 424-5 y el literal f) del artículo 428 del Estatuto Tributario.	Aduana	Artículo 6 Lit. (j)
Decreto 3172 de 2003	Por medio del cual se reglamenta el artículo 158-2 del Estatuto Tributario.	Tributario	Artículo 4 Lit. (e).
Resolución 281 de 2015 – Ministerio de Minas	Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala.	Producción	Artículo 1
Resolución 24 de 2015	Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado Nacional (SIN) y se dictan otras disposiciones	Sistema Interconexión Nacional (SIN)	Artículo 1, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 16, 17
Resolución 106 de 2006	Por la cual se modifican los procedimientos generales para la asignación de puntos de conexión de generadores a los Sistema de Transmisión Nacional, Sistemas de Transmisión Regional o Sistemas de Distribución Local.	Sistema Interconexión Nacional (SIN)	Artículo 1, 3
Resolución 025 de 1995	Por la cual se establece el Código de Redes, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional.	Sistema Interconexión Nacional (SIN)	Artículo
Resolución 070 de 1998	Por la cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional.	Sistema Interconexión Nacional (SIN)	Anexo 4.
Ley 143 de 1194	Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan	Sistema Interconexión Nacional (SIN)	Artículo 5, 24, 30, 31, 52, 54

	otras disposiciones en materia energética		
Ley 9 de 1979	Por la cual se dictan Medidas Sanitarias	Información	Artículo 10, 13, 39, 58
Resolución 0631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones	Ambiental	Capítulo II, III, IV
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones	Ambiental	Artículo 28

Una vez revisado el marco legal descrito anteriormente se observa que la ley 1715 de 2014 es de suma importancia para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica, utilizando fuentes de energías renovables como es nuestro caso, ya que esta ley permite la implementación de los modelos de producción energética renovables al tener en cuenta que su impacto ambiental es un beneficio mayor, e incentivando la competencia, inversión y rentabilidad financiera de este tipo de proyectos, es importante recalcar que a partir de esta ley se han emitido diversos decretos que permiten su interpretación y facilitan los mecanismos legales para la implementación de proyectos energéticos con uso de fuentes renovables.

Dentro de los artículos de la ley 1715 de 2014, los artículo 11, 12 y 13, son de especial interés, pues el primero, estipula que los obligados a declarar renta que hagan inversiones en proyectos de generación, tienen derecho a reducir anualmente su renta por los 5 años siguientes al año gravable que hayan realizado la inversión, hasta un 50% del valor de la inversión realizada; el artículo 12, establece una exención tributaria al IVA, para los servicios y equipos nacionales e importados que se destinen como inversión para la producción de energía a partir de fuentes no convencionales, por último el artículo 13 establece exención de pagos arancelarios de importación para equipos e insumos usados en proyectos de inversión para la producción de energías de fuentes no convencionales, siempre y cuando dichos materiales no sean producidos en el país.

En la resolución 24 de 2015, el artículo 10 establece que, las Autogeneradoras deben gestionar la comercialización de sus excedentes a través del comercializador, mientras

que en el Artículo 12. Establece la capacidad de las plantas Autogeneradoras hasta un máximo de 20MW.

En cuanto a la resolución 281 de 2015, la cual especifica en el artículo 1° **“El límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala será de un (1) MW, y corresponderá a la capacidad instalada del sistema de generación del autogenerador”** por lo que la granja piedras gordas y cachorros, no entrarían dentro de esta clasificación.

Por otro lado es de resaltar que los proyectos con “centrales generadores menores a 10MW no requieren licencia ambiental” (Comision de Regulacion de Energia y Gas (CREG), 2008) sin embargo se debe obtener los permisos necesarios para el uso de suelos.

5.3.2. Entrega de energía eléctrica al gestor de la red.

Una vez revisados, la resolución 025 de 1995 de la CREG y el documento RA9-001 (Conexión y operación de Generadores y Autogeneradoras en el sistema de distribución local de EE.PP.M) de las empresas públicas de Medellín (EPM), se extrajeron los elementos principales del esquema general de interconexión eléctrica al sistema de distribución local o (SDL), que para efectos del presente trabajo, se presentan en forma de proceso en la figura 13; es importante aclarar que aunque el documento RA9-001, no es normativo si es una guía, que permite realizar una clasificación de los Autogeneradoras según su capacidad de generación, ubicando todos los proyectos tanto los de las granjas como los de la planta centralizada en Autogeneradoras clase I o inferiores a una capacidad nominal a 5MVA, por lo que la tensión de suministro deben ser superior a 13.2kV e inferior a 44 kV.

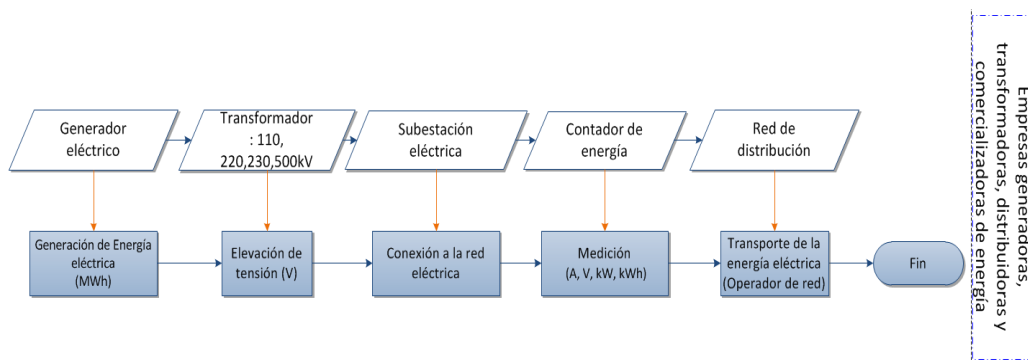


Figura 65 Proceso de interconexión para el SIN

Fuente: (“Análisis de la cadena de suministro de un sistema bioenergético,” 2016)

Como se observa en la figura anterior el proceso de conexión a la red eléctrica cuenta con 5 pasos fundamentales (Generación, Elevación, Conexión, Medición y Transporte),

en cada uno de estos pasos se requieren diferentes equipos por lo cual procederemos a realizar la descripción general de cada equipo para los proyectos de autogeneración de pequeña y mediana escala

5.3.2.1. Conexión al SDL para proyectos de Autogeneración CLASE I.

Generador: Para el modelo de autogeneración en cada granja, se considera la implementación de generadores asincrónicos debido a que la producción de las granjas es menor a los 100kw, mientras que para el de mediana escala centralizado se sugiere un generador sincrónico (anexo3).

Transformador: para ambos proyectos, se establecen transformadores trifásicos de núcleo para elevación, de 220kV, y libres de PCB.

Subestación Eléctrica: Tanto el proyecto de generación energía eléctrica para cada granja, como en el proyecto de la planta centralizada, se establece que, la subestación no es necesaria que sea hermética, sino que puede ser de tipo abierta, lo que implicaría una disminución en el costo de inversión en ese tipo de requerimientos, puesto que en ambos proyectos las condiciones climáticas de humedad y temperatura permiten el uso de este tipo de subestaciones; ya entrando en el diseño de una subestación eléctrica, debido a que este dependerá en sí de cada proyecto, a continuación se listaran los parámetros más relevantes a tener en cuenta para el diseño de la subestación:

Tabla 16 Resumen del marco legal

Datos de Ubicación de la subestación	Datos del sistema eléctrico
Altura sobre el nivel del mar	Estudio de flujo de cargas y Falla del sistema
Temperatura mínima y máxima mensual	Corriente de circuito máximo
Humedad relativa	Requerimientos de estabilidad del Sistema
Viento Máximo	Corriente de corto circuito
Grado de contaminación ambiental	Requerimientos de estabilidad del sistema
Nivel de descargas atmosféricas	Longitud de líneas de transmisión
Estudio Topográfico	Requerimientos de compensación del sistema en el nodo de la subestación
Resistividad del terreno	Sobretensiones transitorias y de régimen permanente.

Sistema de Control: en primer lugar se deben tener en cuenta los medidores de tensión, los cuales se deben ubicar en la subestación, para garantizar niveles adecuados de corriente; por otro lado, debido a que también hay un consumo respaldado en el SIN, se debe instalar un contador de doble vía, con el fin de identificar la cantidad de energía consumida por los proyectos y poder descontar este consumo de la producción.

Cableado al SDL: Tanto como en el modelo de pequeña escala como en el de mediana escala se realizara la entrega de la energía generada por lo que se hace necesario líneas de la acometida eléctrica de venta, para el modelo de pequeña escala donde las granjas produzcan menos de 1MW se sugiere una línea de baja tensión, mientras que para las granjas donde se generan potencias mayores a 1 MW, y en la central de mediana escala se sugiere una línea de mediana tensión, en el decreto 070 de 1998, se encuentran las especificaciones para realizar la interconexión eléctrica.

Teniendo en cuenta lo anterior y el establecimiento de las fronteras comerciales en la En la resolución 157de 2011 de la CREG a continuación se presenta un esquema básico de conexión aplicable a los proyectos de autogeneración de las granjas y de la planta central.

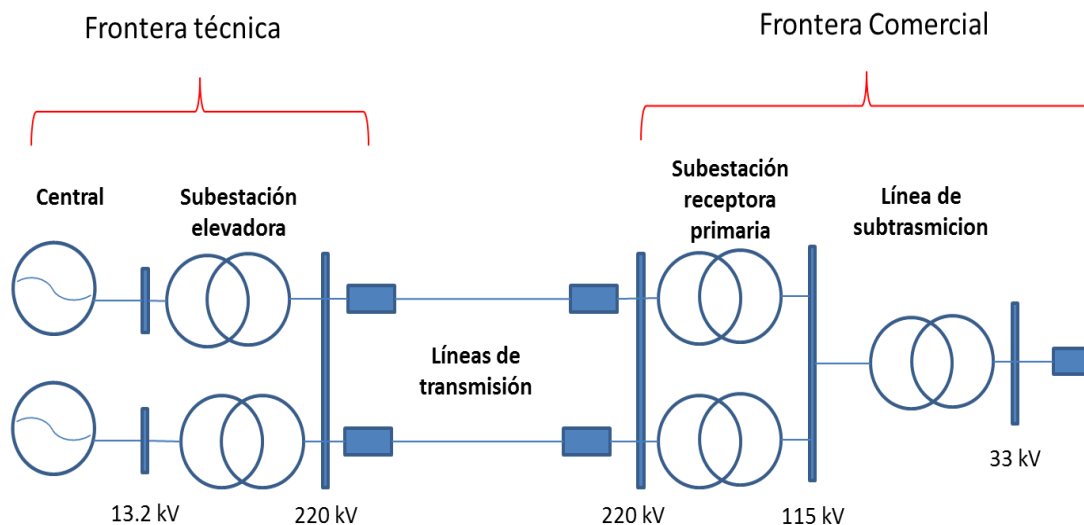


Figura 76 Diseño de interconexión
Fuente:(Gómez & Vargas, 2010) elaboración propia

5.3.3. Evaluación económica y financiera de la producción de energía de la biomasa.

Para realizar la evaluación financiera de los proyectos tanto de autogeneración como de mediana escala se usó el método de valor presente neto (VPN) el horizonte de ambos

proyectos se estimó en **20 años** y se usó una tasa de retorno de **8,14%** que sería la tasa de rentabilidad de un CDT a 360 días (Banco de la Republica, s.f.).

Para realizar el cálculo del flujo de fondos netos por periodo se determinaron los siguientes parámetros económicos relevantes:

- Costos de inversión (instalación)
- Costos operativos (operación y mantenimiento)
- Costo de la materia prima
- Valor de la energía producida

Donde se calcularon los parámetros usando estimadores y referencias de informes europeos, por lo que se usara el euro (€) con una TRM de COP 3269, (Banco de la Republica, 2016) como moneda para los cálculos, además de ser esta una divisa estable

Costos de inversión y costos Operativos:

En cuanto al costo de inversión y los gastos operativos (operación y mantenimiento), se utilizó una estimación basada en el costo de inversión para una planta de generación eléctrica de 2Mw usando Biogás para su producción, en el año 2005 en España anexo 5; con la inflación anual se estimó el costo de la misma planta para el 2016 y se calcularon ambos parámetros según el kwh producido por la planta, obteniéndose los parámetros registrados en la Tabla 17.

Tabla 17 Costos de Inversión y Operativos

Generación Eléctrica con Biogás	
Costo de Operación y Mantenimiento	0,02942€/kw.h
Inversión	1759.482€/kw

Para el cálculo de la inversión requerida en plantas de pequeña escala (autogeneración), para cada granja se debe tener en cuenta, que las granjas evaluadas cuentan con una infraestructura, por lo que para la estimación del costo de inversión se usó una rúbrica (anexo 5) utilizada para este tipo de proyectos por la universidad UTEC de Bremen en Alemania, con la cual se estimó el porcentaje de inversión a realizar en cada planta obteniéndose los datos reportados en la Tabla 18; donde se observa que la granja que menos inversión necesitaría para la generación de electricidad, es la granja de piedras gordas, esto se debe principalmente a que la laguna de digestión que tiene

dicha granja excede el aporte diario obteniéndose un 50% de la inversión necesaria según la rúbrica usada.

Tabla 18 Porcentaje de Inversión Requerida por cada Granja según la rubrica para inversion usada.

Inversión	Cachorros	Piedras Gordas	Arrayanes	Margarita	El Arenal
Desarrollo de proyecto	2%	1.5%	2.0%	2.0%	2.0%
Infraestructura	4%	3.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Digestores	20%	0.0%	40.0%	40.0%	40.0%
Conexión a la red	5%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
Motor de gas	25%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%
Medidas compensatorias	2%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
Ingeniería	7%	5.0%	8.0%	8.0%	8.0%
Total	65.0%	41.5%	86.0%	86.0%	86.0%

Para calcular la inversión de la planta centralizada, teniendo en cuenta que dicha planta se ubicara en las granjas piedras gordas, se asignaron porcentajes de incremento de inversión a cada granja, obteniéndose la Tabla 19, esto se debe a que el aporte en materia prima de las granjas circundantes, conlleva a un incremento de la capacidad del biodigestor requerido para el proceso, por consiguiente se debe realizar una inversión en biodigestores.

Tabla 19 Incremento de la inversión por aporte de la granja

Granja	Cachorros
Cachorros	25%
Arrayanes	10%
Margarita	10%
El arenal	10%

En cuanto al costo de operación y mantenimiento se estima un incremento del 10% anual por la duración del proyecto.

Costos de la Materia Prima

En el caso de las plantas de pequeña escala, el costo de la materia prima es **cero** debido a que este es un material excedente del proceso productivo (cría de cerdos), mientras que en el caso de la planta de mediana escala el costo asociado a la materia prima es el costo de transporte a la planta centralizada, para calcular este costo se usó las tarifas reportadas en el sistema de información de costos eficientes para el transporte automotor de carga (SICETAC), \$ **428,96** por Km por tonelada de carga (**€ 0,131**) anexo 5. Se definió un transporte para la materia prima de un carro tanque de 10 toneladas y se calculó el costo de transporte de la materia prima para el año teniendo en cuenta la producción de cada granja, para obtener la siguiente Tabla 20.

Tabla 20 Distancia y Costo de transporte de la materia prima de las diferentes granjas a la planta de mediana escala ubicada en Piedras Gordas.

Granja	No de Viajes por año	Distancia aproximada a la planta (Km)	Costo total anual transporte de materia prima hasta la planta en piedras gordas
Cachorros	5694	25	€ 179.361,00
Arrayanes	1314	178	€ 179.045,64
Margarita	1533	140	€ 274.805,58
El Arenal	1606	135	€ 226.863,56

Para la estimación del incremento del costo de transporte por tonelada de materia prima se consideró un incremento del 10% anual, puesto que el incremento en el costo de fletes depende del índice de costo de transporte por carretera ICTC donde se considera los siguientes factores (combustibles, peajes, partes y consumibles de vehículos entre otros), debido a que en Colombia hasta el momento se está realizando la implementación del SICETAC, no se tiene información de los costos en años anteriores, ya que se consideraban propios de cada negociación para la industria y dependían de la oferta y la demanda. Sin embargo el gobierno ocasionalmente interviene algunas rutas donde se realizan autorización de incrementos, el último incremento reportado en Colombia es del 8.5%.

Valor de la energía producida Kw.h

En Colombia existen dos diferentes tipos de mercado en donde se puede vender la energía generada:

1. **Mercado Spot o de corto plazo:** este mercado es cotizado en bolsa y su volatilidad es alta, el valor va depender directamente de la situación de los generadores.
2. **Mercado de largo plazo:** Consisten en contratos bilaterales que se realizan con otros generadores, comercializadores (Mercado regulado) o directamente con los grandes consumidores (Mercado no regulado), este mercado es de menor volatilidad ya que son contratos financieros y no interviene el precio de la bolsa.

En el Grafico 6 se observa el comportamiento de los tres sistemas bolsa, mercado regulado y no regulado, para efectos del presente trabajo se consideró como precio del kw.h; el precio establecido para el mercado no regulado oscila entre los COP 150 Y 170, siendo el promedio ponderado del costo de Kw.h **COP 160,14 (€ 0.0490)** (Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica, s.f.).

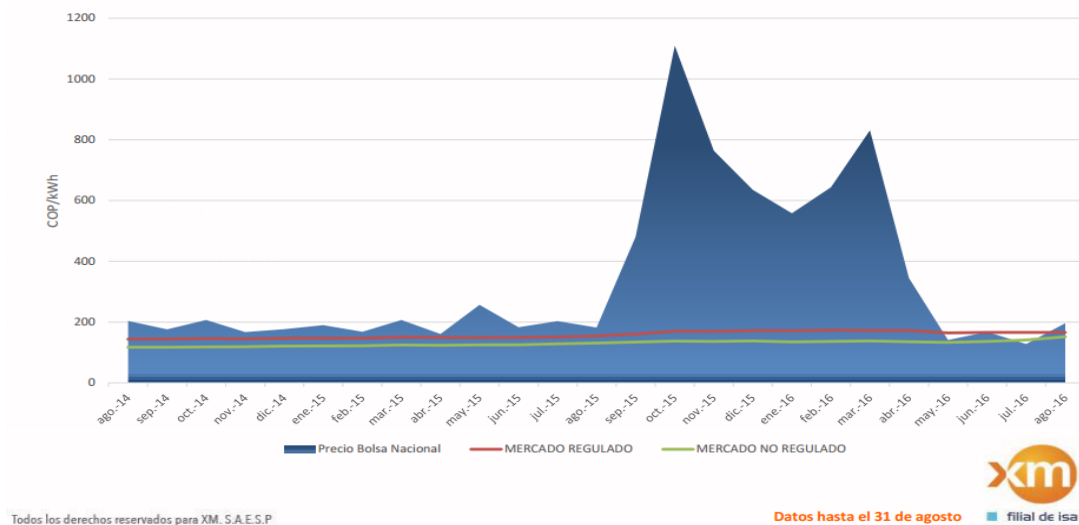
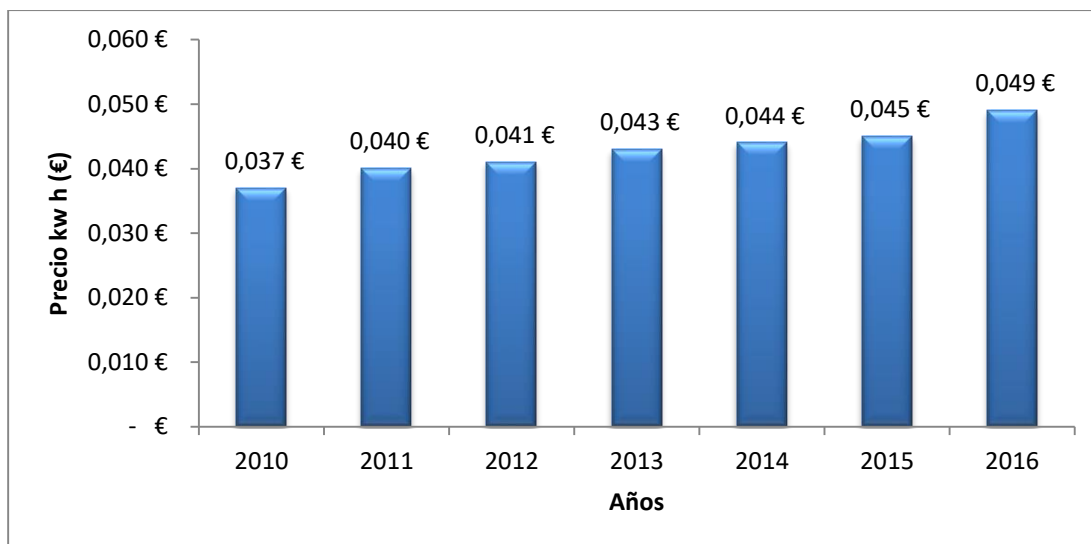


Grafico 6 Precio de Bolsa y Contratos por tipo de Mercado pesos Constantes de Agosto 2016
Fuente Neon - XM (XM S.A.E.S.P, 2016)

Para obtener el flujo neto debido al costo de energía durante la duración del proyecto (20 años), se realizó un incremento porcentual del 5% anual en el costo ya que como muestra la siguiente grafica para el precio promedio anual en centavos de euro por KWh, el incremento promedio para el periodo 2011 al 2016, para este tipo de mercado, es aproximadamente del 5%.



*Grafico 7 Precio promedio anual del kwh en centavos de euros.
Fuente: NEON – XM y DANE(Velez Alvarez, 2015). Cálculos propios*

En el caso de los años 2011 y 2016 se ve un fuerte incremento del precio sin superar el 11% de incremento entre un año y otro, mientras que para los periodos de 2012 al 2015 el incremento no supera el 3% por año. Anexo 5.

5.3.3.1. Evaluación financiera para la producción de pequeña escala.

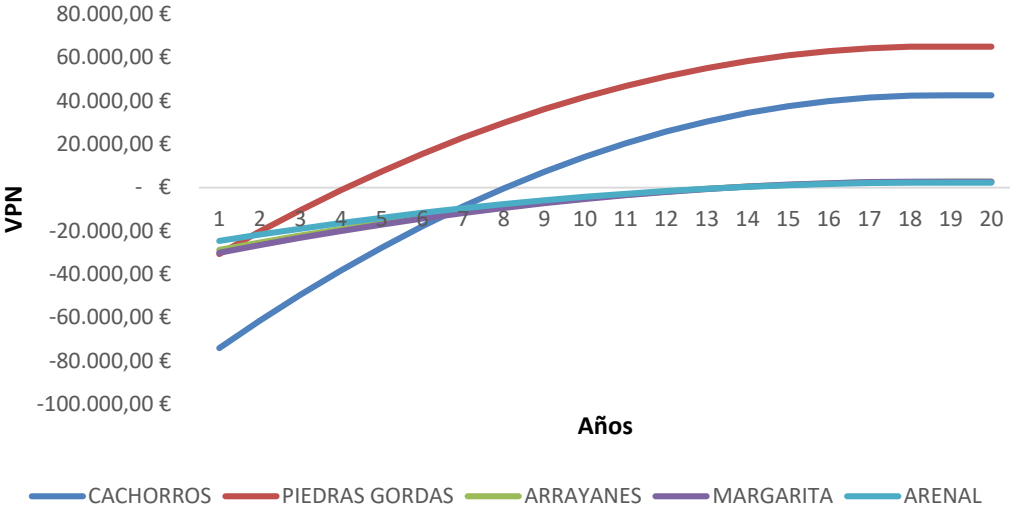
Como se mencionó anteriormente para los cálculos de estos proyecto se estableció un periodo de **20 años** y una tasa de oportunidad (**i***) de **8.14%**, a continuación presentan un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 21 Criterios Financieros por Granja

Granja	Inversión	VPN	TIR	TIRM	IR	PR (años)
Cachorros	107.403,33€	44.891,63 €	14.06%	10.0%	1.42	8.05
Piedras Gordas	56.502,93 €	68.985,60 €	24,03%	12,54%	2,22	4,14
Arrayanes	37.774,64 €	2.709,32 €	9.22%	8.52%	1.07	13.6
Margarita	40.005,28 €	2.869,31 €	9.22%	8.52%	1.07	13.6
El arenal	32.911,11 €	2.360,49 €	9.22%	8.52%	1.07	13.6

Se observa que todos los proyectos de producción de energía en las granja para el tiempo de vida del proyecto escogido son factibles, tal como lo muestran los 5 criterios elegidos para tal fin (VPN, TIR, TIRM, IR y PR).

Se puede evidenciar que el mejor proyecto de inversión, se encuentra en la granja Piedras Gordas debido a que el VPN (**68.985,60 €**) de este proyecto la TIR(**24.03%**), TIRM (**12.54%**) e IR (**2.22**) son los más altos, mientras que el PR (**4.14**) es el más bajo, de esta forma se tendría una recuperación de la inversión en un corto tiempo, y luego seguiría; la granja Cachorros sería la segunda mejor inversión, mientras que las demás granjas tienen valores similares ya que su producción es equiparable con diferencias en el costo de inversión, sin embargo el PR de estas plantas está cercano al 50% de vida útil de la planta, adicional a esto su TIR y TIRM no son muy altas y el VPN es más bien bajo, a continuación se presentan el comportamiento del VPN para los proyectos de inversión de cada granja en el tiempo de duración del proyecto.



*Grafico 8 Función del VPN en el tiempo para los diferentes proyectos.
Fuente: Elaboración Propia*

En el Grafico 8 se observa que el proyecto cachorros aunque es el segundo proyecto más factible pues su PR es el segundo menor de los proyectos (8.05 años), es el proyecto que más reporta pérdidas hasta alcanzar su punto de equilibrio, mientras que el proyecto de piedras gordas sus pérdidas son menores y su tiempo de recuperación es de casi la mitad del tiempo que el de cachorros, a continuación se muestra la función VPN para la granja piedras gordas.

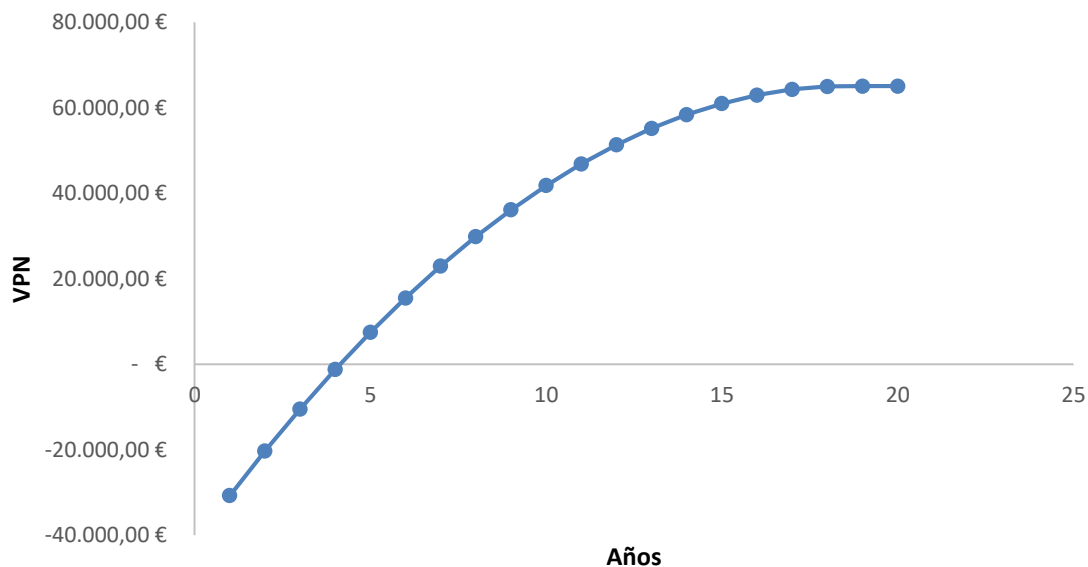


Gráfico 9 Función del VPN para la granja Piedras Gordas
Fuente: Elaboración Propia

5.3.3.2. Evaluación financiera para la producción de mediana escala

Para la evaluación financiera de este modelo se tuvo en cuenta que la combinación de los aportes de materia prima de las granjas (Cachorros, Arrayanes, Margarita y Arenal) afectaba los costos, la inversión y la generación de ingresos del proyecto, por lo que se construyó un modelo matemático binario que permitiera Maximizar el VPN del proyecto al asignar la variable binaria a la mejor combinación de aportes para la planta centralizada. , teniendo en cuenta que para ser considerados una planta menor de generación conectada al servicio integrado nacional (SIN), esta debe tener una capacidad instalada mayor a 1MW y menor a 20MW, por lo que por sí sola la granja de piedras gordas puede cumplir esta restricción, y entendiendo que el modelo de planta centralizada se basa en la colaboración entre las plantas se estableció un límite inferior de producción de 2MW las ecuaciones de dicho modelo se encuentran en el anexo 5. A continuación se muestra los cálculos reportados del modelo.

Tabla 22 Criterios Financieros por Aporte de Granja

Inversión	VPN	PR (años)
-131,848.35 €	-3,773,559.45 €	No se recupera

Como se observa en la tabla 22. El planteamiento del proyecto de planta de mediana escala “no es factible” financieramente para el escenario encontrado por el modelo, en

donde el aporte de materia prima lo hace únicamente la granja Cachorros, al hacer un análisis del modelo se observa que el costo de la materia prima (Transporte) es la variable que más impacta el proyecto haciéndolo inviable en su operación, debido a la distancia que existe entre las granjas y el No de viajes que se deben realizar para transportar el material a ser digerido (Tabla 20).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación de pre factibilidad para generación de energía eléctrica a partir de Biomasa residual, en cinco granjas de cerdo de una industria porcícola del Valle del Cauca, se concluye lo siguiente:

1. De los tres modelos estudiados, los cuales siguen el estándar europeo (planta de pequeña escala, planta de mediana escala, y planta de gran escala), se considera que para la empresa objeto de estudio aplican los dos primeros modelos, debido a los siguientes parámetros estudiados:
 - a. Tamaño de las granjas.
 - b. Inventario de cerdos.
 - c. Capacidad de producción de biogás y energía.
 - d. Normatividad aplicable.

Donde las granjas arenal, margarita y esmeraldas, se ubicarían en el modelo de pequeña escala, mientras que las granjas de cachorros y piedras gordas, así como la planta centralizada, se ubicarían en el modelo de mediana escala.

2. Para los proyectos de generación eléctrica de cada granja, se estima que cada una de ellas generaría aproximadamente entre 2 y 2,5 veces su consumo, lo cual es suficiente para satisfacer la demanda propia y entregar un excedente al sistema eléctrico interconectado nacional (SIN).
3. La producción de energía de una planta centralizada alimentada con la biomasa de las granjas estudiadas, tendría la capacidad de cubrir la demanda eléctrica de dichas granjas y generar un excedente del 41% del total de consumo.
4. La ubicación de la planta centralizada se estimó, según el modelo de CDG, sin embargo por operatividad, se desplazó 40Km de su ubicación en el modelo, dando como resultado que la mejor ubicación de dicha planta sería en las granjas piedras gordas.
5. A partir de la ley 1715 de 2014 del marco legal colombiano para la producción de energía renovables, se han hecho mejoras importantes en la legislación para poder implementar dicho tipo de energía, entre las cuales se destaca para nuestro proyecto la posibilidad de venta del excedente de energía de las plantas Autogeneradoras de gran escala documento CREG 097 de 2014 (mayores a 1 MW, resolución 281 de 2015); sin embargo hasta el momento no se ha definido

los mecanismos para la venta del excedente de energía eléctrica para los Autogeneradoras menores a 1MW pequeña escala.

6. Al evaluar los criterios financieros escogidos (VPN, TIR, TIRM, IR, y PR) para los proyectos de generación en cada granja, se establece que todos los proyectos son factibles financieramente, siendo los proyectos de generación eléctrica en el siguiente orden, granjas de piedras gordas y granja cachorros los más interesantes debido a su menor tiempo de recuperación, mayor VPN, TIR y TIRM.
7. Las granjas piedras gordas es el proyecto de inversión más deseable ya que presenta una menor inversión de 56.502.93 € (**COP 184'708.078**), el mayor VPN de los proyectos 68.985,60€ (**COP 225'513.926**), mayor TIR y TIRM (24,03% y 12,54%) y el menor periodo de recuperación PR 4,14, con lo cual el proyecto obtendría una recuperación de la inversión en un 16% del tiempo de vida útil del proyecto.
8. Para el caso de inversión del proyecto en la granja cachorros, aunque es viable financieramente, ya que su VPN 44.891,63 € (**COP 146'750.738**), TIR y TIRM 14,06 y 10% respectivamente, su inversión es el doble de la de piedras gordas 107.403, 33 € (**COP 351'110.48**) y su periodo de recuperación es casi a la mitad del proyecto 8.05 años, adicional es el proyecto que más genera pérdidas hasta su punto de equilibrio, debido principalmente a su alta inversión.
9. Para el modelo de la planta centralizada de mediana escala, la cual es alimentada por las granjas, según los criterios escogidos para su evaluación financiera no es factible financieramente, puesto que su VPN es negativo -3'773.559,45 € (**COP -12.335.765.842,05**).
10. Al evaluar cada uno de los parámetros para el proyecto de mediana escala, se observa que el costo de transporte de la materia prima, es el factor que más impacta el proyecto; en los modelos evaluados de estas características se evidenció que la distancia promedio circundante a la planta para la recolección de la biomasa, es de 10 Km, mientras que en la granja escogida para dicho fin (PIEDRAS GORDAS) según el modelo de centro de gravedad (CDG), la granja más cercana se encontraba a 25 Km y la más lejana a 178 Km.
11. Al correr el modelo binario, se establece que no hay una combinación factible entre las granjas para la realización de una planta de mediana escala con ubicación en las granjas piedras gordas que sea factible para un proyecto de esta envergadura.

Recomendaciones

1. Cambiar el modelo actual para la generación de biogás en las granjas cachorros, arenal, margarita y arrayanes (biodigestor tipo taiwan) al sistema de la granja de piedras gordas (laguna anaeróbica), ya que este permite un mayor aprovechamiento del material orgánico (excretas) para la producción de biogás, tal como se observó entre las variaciones de las estimaciones en producción con el sistema actual y el teórico.
2. En caso de requerir hacer una inversión en el corto plazo, se recomienda tomar solo el proyecto de generación eléctrica para la granja piedras gordas, ya que es el proyecto más atractivo financieramente pues es el de menor costo de inversión 56.502.93 € (COP 184'708.078), y menor PR(4.04 años) así como el de mayor VPN, 68.985,60€ (COP 225'513.926), adicional como se explicó anteriormente dentro de la normatividad colombiana se encuentra dentro de la clasificación de Auotgeneradoras mayores a 1MW.
3. Se recomienda evaluar la posibilidad de un proyecto de generación conjunta entre las granjas de piedras gordas y cachorros, disminuyendo los costos de transporte de la materia prima al evaluar una flotilla de carro tanques o a través de ducteria ya que la distancia entre ambas granjas es de 25 Km.
4. Revisar el modelo de planta centralizadas, ubicando la plantas a una distancia no superior a 10km, de las granjas que lo abastecen, para esto se debe incluir la totalidad de las granjas para su estudio usando un modelo de localización.
5. Se recomienda evaluar como alternativa a la generación eléctrica, la inyección del metano refinado a la red de gas.
6. Realizar la evaluación del impacto ambiental para estimar los costos de reducción por prácticas limpias en la emisión de gases que actualmente las granjas emiten por quema del Biogas

BIBLIOGRAFIA.

1. Aune, F. R., Marit Dalen, H., & Hagem, C. (2012). Implementing the EU renewable target through green certificate markets. *Energy Economics*, 992-1000.
2. Asociacion Colombiana de Generadores de Energia Electrica. (s.f.). www.acolgen.org.co. Obtenido de <http://www.acolgen.org.co/>
3. Banco de la Republica. (2016). www.banrep.gov.co. Obtenido de [http://obieebr.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&Action=prompt&path=%2Fshared%2Fseries%2Festad%2F3%2FADsticas%2F1.%2FMonedas%2Fde%2Freserva%2F1.2.TCM_Para%2F un%2F rango%2F de%2F fechas%2F dado&Options= rdf&lang=es&NQUser=publico&NQPassword=publico](http://obieebr.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&Action=prompt&path=%2Fshared%2Fseries%2Festad%2F3%2FADsticas%2F1.%2FMonedas%2Fde%2Freserva%2F1.2.TCM_Para%2Fun%2F rango%2Fde%2F fechas%2F dado&Options= rdf&lang=es&NQUser=publico&NQPassword=publico)
4. Bioenergy Department, University of Southern Denmark. (2000). *Danish Centralised Biogas Plants - Plant Descriptions*. Odense: Cs Grafisk.
5. Chile, I. d. (2005). *Recomendaciones Tecnicas para la Gestion Ambiental en el Manejo de Purines de la Explotacion Porcina*. Santiago de Chile: Marval Ltda.
6. Comision de Regulacion de Energia y Gas (CREG). (2008). *Aspectos Jurídicos Ambientales para Proyectos de Generacion de Energía en Colombia*. Bogota: Comision de Regulacion de Energia y Gas (CREG).
7. Cerdá Tena, E. (2011). *La biomasa en España*. Madrid, Madrid: Fundacion Ideas.
8. Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 1412-1421.
9. Colin, W. (1996). *Ciencia y práctica de la producción porcina* (1 ed.). Zaragoza, España: Acriba S.A.
10. Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit. (2010). *Leiftadenbiogas*. Alemania.
11. DOURMAND, J. (1991). Maîtrise de la charge polluante des effluents des élevages porcins. *ournée Régionale EDE de Bretagne*, 20.
12. Fischer, T., Krieg, A., & Chae, K. J. (2002). Farm - Scale Biogas Plant. *Journal of Korean Organic Waste Reciclyng Council*, 9, 136-144.
13. Fondo Europeo de Desarrollo Regional; Programa de Cooperacion Transfronteriza España - Portugal; Altercexa. (2010). *Informe Complementario*

sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del Biogas en extremadura, en el marco del proyecto de cooperacion transfronteriza España-Portugal Altercexa, para el aporyo al cambio climatico a traves del fomento d. Extremadura, Alentejo: Junta de Extremadura, Consejeria de Industria , Energia y Medio Ambriente.

14. ICA. (Agosto de 2016). www.ica.gov.co. Obtenido de <http://www.ica.gov.co/getdoc/8232c0e5-be97-42bd-b07b-9cdbfb07fcac/Censos-2008.aspx>
15. Instituto AgriFood Research; Instituto Agro Business park; Agrotech; Swedish Institute of Agriculture and Environmental Engineering. (2011). *Best Available Technologies for Pig Manure Biogas Plants in the Baltic Sea Region*. Stockholm: Baltic Sea 2020.
16. Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile. (Diciembre de 2005). Recomendaciones Tecnicas para la Gestion Ambiental en el manejo de Purines de la Explotacion Porcina. *Recomendaciones Tecnicas para la Gestion Ambiental en el manejo de Purines de la Explotacion Porcina*. Santiago de Chile, Chiles: Marval.
17. Leon, E., & Martin, M. (2016). Optimal production of power in a combined cycle from manure based. *Energy Conversion and Management*, 89-99.
18. Ministerio de Industria y Comercio Gobierno de España, I. p. (2005). *Plan de Energias Renovables eb España 2005-2010*. Revision, Instituto para la Diversificacion y Ahorro de Energia.
19. Observatorio Industrial del Sector de fabricantes de Bienes de equipo. (2011). *Biomasa. Oportunidades para el Sector de fabricantes de Bienes de equipo*. Madrid: Fedit.
20. Paramio, Teresa; Piedrafita, Jesus; Mateu, Enric. (2014). *Manejo Y Produccion Porcina*. Barcelona: Universidad Autonoma de Barcelona.
21. PORCICULTORES, A. C. (2014). *INFORME DE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN DESARROLLADOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2014*. Bogota: Asociacion Colombiana de Porcicultores.

22. Seagren, E., Levine, A., & Dague, R. (1991). High pH Effects in Anaerobic Treatment of Liquid Industrial Byproducts. *45th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings*, (págs. 337 - 386). Miami.
23. Unidad de Planeación Minero energética. (2016). *Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia*. Bogotá.
24. Unidad de Planeación Minero Energético (UPME). (2015). *Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia*. Bogotá: La Imprenta Editores S.A.
25. Velez Alvarez, L. G. (2015). *El precio de la electricidad en Colombia y comparación con referentes internacionales 2012 - 2015*. Medellín.
26. Waqar, U., B., K., Neelofar, S., & Muhammad, M. (Noviembre de 2015). Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
27. Wojciech M, B. (2015). A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1148-1171.
28. XM S.A.E.S.P. (2016). *Informe de Precios y Transacciones del Mercado*.
29. Yuan, H., & Zhu, N. (2016). Progress in inhibition mechanisms and process control of intermediates and by-products in sewage sludge anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 429-438.

ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS TRES MODELOS DE PLANTAS DE BIOGÁS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

A1.1. Datos

Tabla 23. Distribucion de la produccion nacional de cerdos (ICA, 2016)

Departamento	Total de Cabezas Porcinas	Total granjas tecnificadas de Ciclo completo
ANTIOQUIA	1753388	0
CUNDINAMARCA	517939	819
VALLE	416784	473
META	236264	38
BOYACA	235357	8
CAUCA	192122	2
MAGDALENA	176580	274
CORDOBA	157516	0
NARINO	149994	0
CALDAS	133323	160
RISARALDA	131529	7
SUCRE	124455	3
ATLANTICO	100820	62
HUILA	84654	1424
BOLIVAR	81568	15
TOLIMA	77176	5
SANTANDER	74680	0
QUINDIO	70140	37
NORTE-SANTANDER	68254	0
CESAR	65577	0
ARAUCA	60400	22
CAQUETA	58608	57
LA-GUAJIRA	33064	6822

CHOCO	28850	0
PUTUMAYO	23459	123
CASANARE	22780	353
VICHADA	6641	0
GUAVIARE	5832	0
DISTRITO-CAPITAL	3708	0
S.ANDRES/PROVID	2223	16
AMAZONAS	500	242
GUAINIA	316	0
VAUPES	163	1

A1.2. Planta Centralizada de Gran Tamaño

Para la caracterización de este modelo de producción se utilizaron como referencia 5 plantas ubicadas en Europa las cuales se muestran a continuación:

Tabla 24. Resumen Datos plantas de gran tamaño (Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 2000)

DATOS	Plantas				
	Güstrow	Zaidin	Morsoe Bionergy	Arhus Nord	Lemvig
País	Alemania	España	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca
Substrato	desechos vegetales y cultivos energéticos	Purín de Cerdo	Purín de Cerdo, y de vaca	Purín de Cerdo, y de vaca	Purín de Cerdo, y de vaca
Toneladas Año	No se tiene la información	180.000	390.000	143.080	160.600
Obtención del sustrato	Granjas cercanas	Granjas cercanas	Granjas cercanas	Granjas cercanas	Granjas cercanas

Pretratamiento	Homogenización y Pasteurización	Homogenización y Pasteurización	Homogenización y Pasteurización	Homogenización y Pasteurización	P Homogenización y Pasteurización
Tipo de Proceso Digestión	Directa	Directa	Directa	Codigestión	Codigestión
Tipo de Digestor	tanque en acero	sistema mezcla completa, agitador central	tanque vertical en acero	tanque vertical en acero	tanque vertical en acero
Digestor 1 M3		3449	7000	2 x 3600	3 x 2533
Digestor 2 M3	No aplica	No aplica	No aplica	1 x 1300	
Utilización de gas	Generación eléctrica 22MW el año	Generación eléctrica 750 Kw/h el	Cogeneración 1800 Kw/h el	Generación eléctrica 700 Kw/h el	Generación eléctrica 880 Kw/h el
Utilización de calor	N.A	N.A	1400 Kw/h	N.A	N.A
Puesta en Marcha	2009	N.A	N.A	1995	1992

A1.3. Planta Centralizada de Mediana Escala:

A continuación se presenta los datos técnicos de una muestra de 5 plantas.

Tabla 25. Resumen datos plantas de mediana escala(Frandsen et al., 2011)

Datos	Plantas				
	Liebenburg	Neuerkerode	Heudorf	Rauschenberg	Torregrosa
País	Alemania	Alemania	Alemania	Alemania	España
Substrato	Ensilaje de maíz, purines de cerdos,	Ensilaje de maíz, purines de vacas	Ensilaje de maíz, ensilaje de hierbas, purines de vacas	Ensilaje de maíz, purines de vacas	Purín de cerdo
Ton Año	N.A	N.A	N.A	N.A	27000
Digestor	1.500 m ³ sistema mezcla completa, agitador central	2.000 m ³ sistema mezcla completa, Agitador central	1.500 m ³ sistema mezcla completa, agitador central	1.500 m ³ sistema mezcla completa, agitador central	1.700 m ³ sistema mezcla completa, agitador central
Post digestor	1.500 m ³ sistema mezcla completa, agitador central	1.000 m ³ sistema mezcla completa	2.900 m ³ sistema mezcla completa, agitador central	1.000 m ³ sistema mezcla completa	2 digestor 1700m ³
Instalación de gas	secado y compresión de gas, antorcha	Almacén de gas como membrana doble de PVC sobre el post-digestor, antorcha	secado y compresión de gas, antorcha	secado y compresión de gas, antorcha	secado y compresión de gas, antorcha
Utilización de gas	cogeneración con motor de gas 526 Kwel, Gas-Otto	cogeneración con motor de gas 537 Kwel, Gas-Otto	Cogeneración con motor de gas 365 kWel, Gas-Otto	cogeneración con motor de gas 526 kWel, Gas-Otto	Cogeneración con motores de 250 kw
Utilización de calor	Calefacción de hospital "Privat-Nervenklinik Dr.med. Kurt Fontheim"	Alimentación de calor para el hospital "evangelischen Stiftung Neuerkerode"	Calefacción de la finca y calefacción de casas cercana	Calefacción de "Hofgut Fiddemühle"	N.A

puesta en marcha	2007	2005	2007	2007	2015
-------------------------	------	------	------	------	------

A1.4. Planta de pequeña escala Autogeneración:

A continuación se presenta los datos técnicos de una muestra de 4 plantas pequeñas de autogeneración.

Tabla 26. Resumen datos Plantas de autogeneración

Datos	Plantas			
	Ecologic Biogas	Sepade	Filskov	Davinde
País	España	Chile	Dinamarca	Dinamarca
Substrato	Purines de cerdo, residuos organicos	Purines de cerdo, Vacunos y desechos de alimentos	Purines de cerdo, Cultivos energéticos	Purines de cerdo, Cultivos energéticos
Ton Año	11.500	N. A	18.000	10.220
Digestor	1270 m3	200 m3	880 m3	750 m3
Post digestor	1270 m3	N.A	N.A	N.A
Generación eléctrica	191 kw/h	35 Kw/h	375 Kw/por ciclo	N.A
Generación Calor	214 Kw/h	65 kw/h	N.A	N.A
Utilización de calor	Uso propio	Uso Propio	N.A	Uso propio, Quemador de caldera
puesta en marcha	N. A	2008	1997	1998

ANEXO 2. DATOS Y ECUACIONES PARA CALCULAR LA PRODUCCIÓN DE EXCRETAS, BIOGÁS, Y ENERGÍA.

A2.1. Datos recolectados en la granja

Tabla 27. Inventario de cerdos

Datos	Cachorros	Piedras gordas	Arrayanes	Margarita	Arenal
-------	-----------	----------------	-----------	-----------	--------

Inventario cerdos	Gestantes	1908	1704	505	1129	
	Lactantes	342	293	90	202	
	Vacíos	168	130	21	78	
	Reemplazo	275	310	144	187	
	Descarte	4	18	17	5	
	Machos	41	8	12	14	
	Precebo	12174	9656	2387	6523	6700
	Cebo	13998	11709	4508		
	Total	28910	23828	7684	8138	6700

Tabla 28. Parametros de las granjas según el estadio del animal

Tipo de Cerdo	Peso Promedio (Kg)	Consumo de Agua (L/día)	Consumo de Alimento (Kg/día) x100kg De Peso Vivo
Gestantes	140	15	2.6
Lactantes	125	40	2.5
Vacíos	120	9	2.6
Reemplazo	140	15	2.6
Descarte	150	15	2.6
Machos	150	20	3
Precebo	75	7	0.6
Cebo	125	15	2.6

Tabla 29. Tipo de digestores ubicados en las granjas

Granja	Tipo de Biodigestor	Días de retención	Factor de producción por M3 del biodigestor
Cachorros	Taiwán	10	0.3

Piedras Gordas	Laguna de Oxidación	30	0.3
Arrayanes	Taiwán	10	0.3
Margarita	Taiwán	10	0.3
Arenal	Taiwán	10	0.3

A2.2 Guía Chilena INLIA.

Datos

Tabla 30. Datos Produccion excretas según el tip de cerdo (Chile, 2005)

Tipo de Cerdo	Peso Promedio (Kg)	Producción excretas (L/día)	Solidos Totales (Kg/día)	Solidos Volátiles (kg/día)
Cría	16	1	0,09	0,08
Recría	29	1,8	0,18	0,14
Engorda	68	4,3	0,41	0,33
Gestación	125	4,2	0,37	0,30
Maternidad con Cría	170	15,1	1,36	1,09
Verraco	159	5,3	0,45	0,38

Ecuaciones

Con los datos de la tabla anterior y siguiendo la ecuación 1. Se puede realizar el cálculo del flujo de purín para una granja.

$$FT_e = (FE_r \times Na_r) + (FE_g \times Na_g) + (FE_c \times Na_c) + (FE_{ge} \times Na_{ge}) + (FE_m \times Na_m) + (FE_v \times Na_v)$$

Ecuación 8. Calculo de Flujo total de excretas (Chile, 2005)

Dónde:

FT_e: Flujo Total de excretas en lt·día⁻¹

FE_r: Flujo de excretas de Recrías en lt·día⁻¹

FE_g: Flujo de excretas de Engorda en lt·día⁻¹

FE_c : Flujo de excretas de Cría en $lt \cdot día^{-1}$
 FE_{ge} : Flujo de excretas de Gestación en $lt \cdot día^{-1}$
 FE_m : Flujo de excretas de Maternidad con Crías en $lt \cdot día^{-1}$
 FE_v : Flujo de excretas de Verraco en $lt \cdot día^{-1}$
 N_{ar} : Número de animales de Recría
 N_{ag} : Número de animales de Engorda
 N_m : Número de animales Crías
 N_{ar} : Número de animales de Gestación
 N_{ag} : Número de animales Verracos
 N_m : Número de animales Maternidad con Crías

A2.3. Guía para la Implementación de la Producción de Biogás UPME.

En esta guía se encontraron los siguientes datos y ecuaciones, con los cuales se construyeron la producción de Biogás para cada granja.

Datos

Tabla 31. Parametros según el tipo de sustrato (Unidad de Planeacion Minero Energetico (UPME), 2015)

Clase de Animal	% por peso vivo		% EST solidos	%Solidos Volátiles	P - producción de Biogás (m3 de gas/ 1kg sv)
	PE - Estiércol	PO - Orina			
Vacunos	5	4	15 - 16	13	0.25
Cerdos	2	3	16	12	0.35
Caprinos	3	1.5	30	20	0.20
Caballos	5	4	25	15	0.25
Avícolas	4.5	4.5	25	17	0.40
Humanos	1	2	20	15	0.30

Ecuaciones

$$E = NA \times PVP \times PE$$

Ecuación 9. Calculo producción de estiércol solido

$$O = N_a \times PVP \times \left(\frac{PO}{100} \right)$$

Ecuación 10. Calculo producción de orín

$$MPC = E + O$$

Ecuación 11. Calculo cantidad Materia prima de carga

$$\%ST = \frac{Ex\%EST}{MPC}$$

Ecuación 12. Calculo % Solidos Totales

$$TR = (-51.227 \times \ln(T^\circ) + 206.72)$$

Ecuación 13. Calculo del Tiempo de Retención Hidráulica

$$V_d = CxTR \times 1.2$$

Ecuación 14. Calculo Volumen biodigestor

$$P_G = MPC \times S_v \times P$$

Ecuación 15. Calculo producción estimada de Biogás

Dónde:

E: Estiércol en kilogramos por día

O: Orín día en kilogramos (se asume que 1 litro de orín pesa 1 kilogramo)

N_a: Número de animales por una especie (vacas, cerdos, caballos, humanos, etc)

PVP: Peso vivo promedio por animal

PE: Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo

PO: Producción de orín por animal por día en porcentaje de peso vivo (se asume que 1 litro de orín pesa 1 kilogramo)

MPC: Materia prima para carga en kilogramos por día.

%EST: Porcentaje de sólidos en el estiércol

TR: Tiempo de retención en días

T°: Promedio de temperatura ambiente en °C del área donde se instala el biodigestor.

V_d: Volumen del Biodigestor en Litros.

PG: Gas producido en litros por día

S_v: Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie. (Solidos volátiles)

P: Producción aproximada de m³ de gas/1 kg de masa orgánica seca total

ANEXO 3. FICHA TÉCNICA GENERADOR ELÉCTRICO

ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERADORES DE 50 – 132 kW

ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERADORES							
	Standby(kVA)	50	66	83	99	116	132
	Model	AQL50	AQL66	AQL83	AQL99	AQL116	AQL132
standby power	kVA/kW	50/40	66/53	83/66	99/80	116/92	132/106
prime power	kVA/kW	45/36	60/48	75/60	90/72	105/84	120/96
frequency	Hz	60	60	60	60	60	60
rated voltage	V	480	480	480	480	480	480
brand	—	Cummins brand-new gas engine					
model	—	4BTAA	4BTAA	6BTAA	6BTAA	6CTAA	6CTAA
displacement	L	3,9	3,9	5,9	5,9	8,3	8,3
speed	RPM	1800	1800	1800	1800	1800	1800
compression ratio	—	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1
cooling method	—	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled
brand alternator	—	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
model	—	LSA 42.3 S5	LSA 42.3 M8	LSA 43.2 L65	LSA 43.2 L8	LSA 44.2 VS3	LSA 44.2 VS45
phase	—	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
controller type	—	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320
display	—	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD
fuel	—	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas
gas inlet pressure	kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa	1-5.5kPa
dimension (open type)	mm*mm*mm	1950*1000*1450	2500*1200*1600	2280*1050*1500	2280*1050*1500	2250*1050*1560	2250*1050*1560
net weight (open type)	kg	1000	1000	1000	1000	1350	1350
biogas consumption	m ³ /kW.h	0,58	0,58	0,58	0,55	0,58	0,55

Figura 15. Ficha tecnica Generador AQUALIMPIA para granja de pequeña escala



ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERADORES DE 198 – 625 kW

ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERADORES						
	Standby(kVA)	198	248	315	600	825
	Model	AQL198	AQL248	AQL315	AQL600	AQL825
standby power	kVA/kW	198/158	248/198	315/252	600/481	825/660
prime power	kVA/kW	180/144	225/180	286/229	546/437	750/600
frequency	Hz	60	60	60	60	60
rated voltage	V	480	480	480	480	480
brand	—	Cummins brand-new gas engine				
model	—	M-NTAA855	M-NTAA855	M-KTAA19	M-KTAA38	M-KTAA50
displacement	L	14	14	19	37,8	50,3
speed	RPM	1800	1800	1800	1800	1800
compression ratio	—	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1
cooling method	—	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled	water cooled
brand alternator	—	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer	Leroy Somer
model	—	LSA 44.2 M95	LSA 46.2 M5	LSA 46.2 L6	LSA 47.2 S5	LSA 49.1 S4A
phase	—	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires	3 phases, 4 wires
controller type	—	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320	DeepSea DSE7320
display	—	LCD	LCD	LCD	LCD	LCD
fuel	—	biogas	biogas	biogas	biogas	biogas
gas inlet pressure	kPa	2-6kPa	2-6kPa	2-6kPa	100-300kPa or 2-3 bar	
dimension (open type)	mm*mm*mm	2900*1200*1850	2900*1200*1850	3240*1300*1920	4600*2060*2380	4800*2200*2400
net weight (open type)	kg	2200	2200	4630	7500	9800
biogas consumption	m ³ /kW.h	0,58	0,55	0,53	0,53	0,53

Figura 16. Ficha tecnica Generador AQUALIMPIA para Planta de mediana escala

ANEXO 4. CENTRO DE GRAVEDAD

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ix} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Ecuación 16. Coordenadas en x

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iy} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Ecuación 17. Coordenadas en y

C_x = Coordenadas de la nueva instalación en “x”.

C_y = Coordenadas de la nueva instalación en “y”.

d_{ix} = Distancia de la ubicación i en términos de la coordenada en “x”.

d_{iy} = Distancia de la ubicación i en términos de la coordenada en “y”.

V_i = Aporte en la ubicación i

Tabla 32. Resumen datos para centro de Gravedad

Granjas	X	Y	Toneladas de sustrato (V_i)	$d_{ix} * V_i$	$d_{iy} * V_i$
ARRAYANES	5,9	2,8	42	247,8	117,6
EL ARENAL	6,1	5	36	219,6	180
LA MARGARITA	6	5	44,4	266,4	222
PIEDRAS GORDAS	8,05	15	128,4	1033,62	1926
CACHORROS	8,1	16,1	156	1263,6	2511,6
Sumatoria			406,8	3031,02	4957,2

Con los datos anteriores se calculan las coordenadas en “x” y “y”

$$C_x = 7,45088496$$

$$C_y = 12.1858407$$

ANEXO 5. ANALISIS FINANCIERO

A5.1. Parámetros Financieros

Tabla 33. Parámetros financieros (Ministerio de Industria y Comercio Gobierno de España, 2005)

Generación Eléctrica con Biogás	
Potencia Eléctrica	2Mw
Rendimiento global	27,09%
Vida Útil	20 años
Costo de Operación y Mantenimiento	0,025122 €/kw.h
Inversión	1.502,53 €/kw.h
Producción eléctrica bruta	35.000 Mwh/año

Tabla 34. Inflación anual en España del 2005 al 2016

Año	Inflación
2005	
2006	2.667%
2007	4.221%
2008	1.433%
2009	0.795%
2010	2.988%
2011	2.378%
2012	2.867%
2013	0.253%
2014	-1.043%
2015	0.017%
2016	-0.535%

Tabla 35. Rubrica (Fondo Europeo de Desarrollo Regional; Programa de Cooperación Transfronteriza España - Portugal; Altercexa, 2010)

Inversión	Costo proporcional
Desarrollo de proyecto	3%
Infraestructura	5%
Digestores	50%
Conexión a la red	5%
Motor de gas	25%
Medidas compensatorias	2%
Ingeniería	10%



Ministerio de Transporte

REPUBLICA DE COLOMBIA

OFICINA DE REGULACION ECONOMICA - COSTO DE OPERACION DEL TRANSPORTE DE CARGA TERRESTRE

Fecha de consulta: 2016/09/29 13:01:40

Condiciones registradas por el Usuario			
Características del Viaje			
Origen	CALI	Destino	CARTAGO - VALLE DEL CAUCA
Tipo de Carga	General		
Características del Vehículo			
Configuración	2		
Tiempos logísticos acordados			
Horas acordadas de espera para el cargue			1
Horas acordadas de cargue			1
Horas acordadas de espera para el descargue			1
Horas acordadas de descargue			1
Horas acordadas de consecución carga			0

Parámetros Generales	
Horas hábiles al mes	288
Distancias	175.82
Velocidad promedio	26
Porcentaje de Ica y porcentaje de retención en la fuente	1.30%
Porcentaje de comisión al conductor	8.00%
Porcentaje de administración del vehículo	5.00%
Capacidad vehículo	9

Resumen de Costos	
Costo total de movilizar la carga (1)	\$602,842.00
Costo total de los tiempos de espera, carga, descarga y consecución de carga (2)	\$75,930.49
Costo adicional de espera (Decreto 2092) (3)	\$0.00
Costo total del viaje (1+2+3)	\$678,772.49
Costo total de una hora adicional de espera, carga, descarga y consecución de carga.	\$18,982.62
Costo por tonelada.	\$75,419.17
Costo total tonelada por KML	\$428.96
Costo total del viaje por KML	\$3,860.60

Figura 17. Costo transporté de materia prima por Km y Tonelada

Tabla 36. Parámetros de distancia y aporte en toneladas de las granjas a la planta de Piedras Gordas

Granja	Distancia aproximada a la planta (Km)	Toneladas de sustrato generadas por día
Cachorros	25	156
Margarita	140	44
El Arenal	135	36
Arrayanes	178	42

Tabla 37. Precio de la energía para el mercado regulado en Colombia 2010 -2015 (Velez Alvarez, 2015)

AÑO	Precio kw.h mercado regulado (COP)	Precio kw.h mercado regulado (€)	Variación por año
2010	\$ 121.00	0.0370 €	
2011	\$ 132.00	0.0404 €	9.1%
2012	\$ 134.00	0.0410 €	1.5%
2013	\$ 140.00	0.0428 €	4.5%
2014	\$ 144.00	0.0440 €	2.9%
2015	\$ 148.00	0.0453 €	2.8%

A5.2 Resultados financieros plantas de Autogeneración

Tabla 38. VPN anual para los proyectos

AÑO	Cachorros	Piedras Gordas	Arrayanes	Margarita	Arenal
0	-86.886,08 €	-45.516,65 €	-30.949,95 €	-32.423,76 €	-26.528,53 €
1	15.259,16 €	12.520,33 €	4.108,23 €	4.303,86 €	3.521,34 €
2	15.677,65 €	12.863,71 €	4.220,91 €	4.421,90 €	3.617,92 €

3	16.059,37 €	13.176,92 €	4.323,68 €	4.529,57 €	3.706,01 €
4	16.395,05 €	13.452,35 €	4.414,05 €	4.624,25 €	3.783,47 €
5	16.674,12 €	13.681,33 €	4.489,19 €	4.702,96 €	3.847,87 €
6	16.884,49 €	13.853,94 €	4.545,83 €	4.762,29 €	3.896,42 €
7	17.012,46 €	13.958,94 €	4.580,28 €	4.798,39 €	3.925,95 €
8	17.042,43 €	13.983,53 €	4.588,35 €	4.806,84 €	3.932,87 €
9	16.956,73 €	13.913,22 €	4.565,27 €	4.782,67 €	3.913,09 €
10	16.735,38 €	13.731,59 €	4.505,68 €	4.720,24 €	3.862,01 €
11	16.355,79 €	13.420,13 €	4.403,48 €	4.613,17 €	3.774,41 €
12	15.792,46 €	12.957,91 €	4.251,82 €	4.454,28 €	3.644,41 €
13	15.016,68 €	12.321,38 €	4.042,95 €	4.235,47 €	3.465,39 €
14	13.996,11 €	11.483,99 €	3.768,18 €	3.947,62 €	3.229,87 €
15	12.694,41 €	10.415,92 €	3.417,72 €	3.580,47 €	2.929,48 €
16	11.070,74 €	9.083,68 €	2.980,58 €	3.122,52 €	2.554,79 €
17	9.079,30 €	7.449,68 €	2.444,43 €	2.560,83 €	2.095,22 €
18	6.668,71 €	5.471,77 €	1.795,42 €	1.880,92 €	1.538,93 €
19	3.781,46 €	3.102,74 €	1.018,09 €	1.066,57 €	872,64 €
20	353,14 €	289,75 €	95,07 €	99,60 €	81,49 €

A5.2 Resultados financieros planta centralizada mediana escala.

A5.2.1 Planteamiento del modelo Matemático Binario de maximización del VPN.

Subíndices

Sea “j” las granjas donde $j = 1, 2, 3, \dots, n$

Sea “z” los periodos (Años) del proyecto con $z = 1, 2, 3, \dots, m$

Variables

$W_j = 1$, si la granja "j" aporta de lo contrario 0

Parámetros

T_j = Toneladas de materia prima de la granja "j"

X_j = Distancia de transporte de la granja "j" a la planta.

C_t = costo de transporte por tonelada por kilometro

N_d = Número de días de operación de la planta

Ctt= Costo total de transporte (materia prima)

$$Ctt = C_t * N_d \sum_{j=1}^n (W_j * T_j * X_j); \forall j$$

Ecuación 18. Costo total de transporte

A_j = Aporte en la producción de energía debida a la materia prima de la granja "j"

H = horas de operación en la planta

V_e = Valor de venta de kwh generado

C_i = Costo de la inversión por kwh generado

C_o = Costo de operación por kwh generado

A_g = Aporte en la producción de energía debida a la granja donde se ubica la planta.

At = aporte total de energía

$$At = H \sum_{j=1}^n ((A_j * W_j) + A_g); \forall j$$

Ecuación 19. Aporte total de energía

Cto= Costo total de la operación de la planta.

$$Cto = N_d * C_o * At$$

$$Cto = Nd * H * Co \sum_{j=1}^n ((A_j * W_j) + Ag); \forall j$$

Ecuación 20. Costo total de operación

Ig= Inversión inicial para construcción de la planta considerando solo la granja donde se ubica la planta.

Ip= Ingresos de la planta

$$Ip = Nd * Ve * At$$

$$Ip = Nd * H * Ve \sum_{j=1}^n ((A_j * W_j) + Ag); \forall j$$

Ecuación 21. Ingresos de la planta

Ij= Incremento de inversión por el aporte de la granja "j"

Io = inversión total para la planta.

$$Io = Ig + Ci \sum_{j=1}^n ((A_j * W_j) + Ag) * W_j * I_j); \forall j$$

Ecuación 22. Inversión total de la planta

Y= porcentaje de incremento anual de los costos de operación en la planta

P = porcentaje de incremento anual de los costos de transporte de la materia prima

M= porcentaje de incremento anual del precio de venta de la energía

L= Porcentaje de incremento anual en la producción de energía.

i*= Interés

Función Objetivo

Maximizar el VPN

$$VPN = -Io + \frac{\sum_{z=1}^m FFN_z}{(1 + i^*)^z}$$

$$VPN = -I_0 + \frac{\sum_{z=1}^m (M * L * Ip_{z-1} - ((Cto_{z-1} * Y) + (Ctt_{z-1} * P)))}{(1 + i^*)^z}; \forall "z"$$

Ecuación 23. Función objetivo VPN

Restricciones

Para el modelo solo se tiene una única restricción que la capacidad de energía de la planta (At) sea mayor o igual a 2Mw (2.000 kw) o 20Mw (20.000kw)

$$1000 \leq At \leq 20000$$

A5.2.1 Datos del modelo Matemático Binario de maximización del VPN para la planta de mediana escala.

Subíndices

Tabla 39. Asociación del subíndice "j" a las granjas para el modelo binario

Granja	j
Cachorros	1
Arrayanes	2
Margarita	3
El arenal	4

Para el subíndice "z", como se mencionó en el apartado 5.3.3 el proyecto se estimó a 20 años por lo que z=[1,2,3...20]

Parámetros

Tabla 40. Parámetros de variación según "j" usados para el modelo binario

j	T _j	X _j	A _j	I _j
1	156	25	88,964	25%
2	42	178	23,952	10%

3	44	140	25,092	10%
4	36	135	20,53	10%

Tabla 41. Parametros economicos usados para el modelo binario

Parámetros	Valores
Ig	53.300,59
Ci (€/kwh)	1.759,482
Co(€/kwh)	0,02942
Ct (€/kwh)	0,126
Ve (€/kwh)	0,049
i*	8,14%

Tabla 42. Parametros Numericos usados para el modelo binario

Parámetros	Valores
Nd (días)	365
H (horas)	24
Ag (kw)	72,996

Tabla 43. Parametros porcentuales de incremento usados para el modelo binario

Parámetros	Valores
Y	10%
P	10%
M	5%
L	2%
i*	8,14%

Resultados

Microsoft Excel 15.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [CALCULOS FINANCIEROS-3.xlsx]mediana escala (3)

Informe creado: 05/10/2016 07:34:03 a.m.

Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.

Motor de Solver

Opciones de Solver

Celda objetivo (Máx)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$L\$12	CACHORROS F.O (max) VPN	-3.936.918,84 €	-3.936.918,84 €

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$C\$12:\$C\$15				

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$D\$28	1) La produccion de energia debe ser superior a 2Mw e inferior a 20 Mw Lizq	3,887136	\$D\$28>=\$F\$28	No vinculante	1,887136
\$D\$29	Lizq	3,887136	\$D\$29<=\$F\$29	No vinculante	16,11286
\$C\$12:\$C\$15=8inario					

Figura 18. Informe de respuesta del modelo binario